

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dip. Territorio e Sistemi Agro-forestali

Corso di laurea magistrale in Scienze forestali e ambientali

Bosco e dinamica dei crolli di roccia in ambiente dolomitico:
Caso di studio di un versante del Monte Antelao
(Vodo di Cadore, Belluno)

Relatore
Prof. Vincenzo D'Agostino
Correlatore
Dott.ssa Tamara Michelini

Laureanda
Arianna Marotto
Matricola n.
1033779

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

INDICE

INDICE	3
INDICE DELLE FIGURE	7
INDICE DELLE TABELLE.....	8
RIASSUNTO	9
SUMMARY.....	11
1. INTRODUZIONE	13
1.1. CLASSIFICAZIONE DEI MOVIMENTI FRANOSI.....	15
1.2. CROLLI DI ROCCIA E CADUTA DI MASSI.....	16
1.2.1. FATTORI PREDISPONENTI E AGENTI D'INNESCO DEL CROLLO	17
1.2.2. DINAMICA DEL MOVIMENTO ED EVOLUZIONE DEL FENOMENO	19
1.2.2.1. DISTACCO	20
1.2.2.2. MOVIMENTO	20
1.3. PRINCIPI FISICI E MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI CROLLO	22
1.3.1. MODELLI DI DINAMICA DEL MOVIMENTO.....	23
1.3.1.1. CROLLO E CADUTA LIBERA.....	23
1.3.1.2. RIMBALZI.....	24
1.3.1.3. ROTOLAMENTI	24
1.3.1.4. SCIVOLAMENTI.....	25
1.3.1.5. IMPATTI ED URTI	26
1.3.2. MODELLI DI RICOSTRUZIONE CINEMATICA	28
1.3.2.1. METODO CINEMATICO A COMPOSIZIONE DI MOTI	28
1.3.2.2. METODO DELLA MECCANICA DEL CORPO RIGIDO	29
1.3.2.3. MODELLO EMPIRICO	29
1.2.3.4. MODELLO SEMPLIFICATO	30
1.2.3.5. MODELLI DEM E GIS.....	30
2.1. IL MODELLO ROCKYFOR3D.....	33
2.2. ALGORITMI DI CALCOLO	34
2.2.1. TRAIETTORIE DI CADUTA.....	34
2.2.2. DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA.....	36
2.2.3. CALCOLO DELLA VELOCITÀ DI CADUTA	37
2.2.4. IMPATTO CON LA FORESTA.....	39
2.3. RASTER DI INPUT E DI OUTPUT DELLA SIMULAZIONE CON ROCKYFOR3D.....	43
2.3.1. FILES DI INPUT.....	43
2.3.2. IMPOSTAZIONI DELLA SIMULAZIONE.....	45
2.3.3. FILES DI OUTPUT	45
2.4. LIMITAZIONI DEL MODELLO.....	47

3.1.	EFFETTO DI PROTEZIONE DELLA FORESTA CONTRO GLI EVENTI DI ROCKFALLS.....	49
3.2.	PROCESSO DI DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA CINETICA IN BOSCO.....	50
3.2.1.	FUNZIONE DIRETTA DEL COMPLESSO FORESTALE.....	50
3.2.2.	FUNZIONE DIRETTA DELLA SINGOLA PIANTA.....	51
3.3.	DANNI E LESIONI	56
3.4.	POSIZIONE OTTIMALE DELLA FORESTA DI PROTEZIONE	56
3.5.	REQUISITI IDEALI DELLA COMPOSIZIONE DELLA FORESTA DI PROTEZIONE.....	58
3.6.	MODELLI DI QUANTIFICAZIONE DELL'ENERGIA.....	59
4.1.	MATERIALI E METODI.....	61
4.2.	AREA DI STUDIO	61
4.2.1.	INQUADRAMENTO CLIMATICO CLIMA	62
4.2.2.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	62
4.2.3.	INQUADRAMENTO FORESTALE.....	63
4.3.	DESCRIZIONE DELL'EVENTO DI ROCKFALL	64
4.4.	RILIEVI DI CAMPO	67
4.4.1.	IDENTIFICAZIONE DELLE AREE DI SAGGIO E RILIEVO DELLA COMPONENTE FORESTALE.....	68
4.2.1.1.	AREA DISTURBATA.....	68
4.2.1.2.	AREA "NON DISTURBATA".....	69
4.4.2.	CAMPIONAMENTO DEI BLOCCHI DI ROCCIA DEL SITO E RILEVAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL VERSANTE	70
4.5.	SIMULAZIONE DEL FENOMENO DI CROLLO CON IL CODICE ROCKYFOR3D.....	71
4.5.1.	PREPARAZIONE DELLO SCENARIO.....	71
4.5.1.1.	DESCRIZIONE E CREAZIONE DEI RASTERS DI INPUT.....	71
4.5.2.	APPLICAZIONE DEL SOFTWARE.....	74
5.1.	RISULTATI	77
5.2.	DINAMICA DEL CROLLO DI MASSI SULLA COPERTURA FORESTALE	77
5.2.1.	ANALISI DEGLI EFFETTI DEL CROLLO DI ROCCIA SUL POPOLAMENTO.....	77
5.2.2.	RISPOSTA ALL'EVENTO DI ROCKFALL: ANDAMENTO DELLE LESIONI E TASSO DI MORTALITÀ.....	78
5.2.3.	CLASSIFICAZIONE DELLE LESIONI PER CLASSE DIAMETRICA.....	80
5.2.4.	POTENZIALE DEL DBH DELLE PIANTE SULLA DISSIPAZIONE ENERGETICA DEI MASSI.....	83

5.3.	SIMULAZIONI DEL ROCKFALL.....	89
5.3.1.	Scenario 1: Analisi dell'effetto della riduzione dei lanci nell'evento di rockfall.	91
	A) Effetto della riduzione dei lanci applicati al medesimo ambiente: versante privo di soprassuolo.	92
	B) Effetto della riduzione dei lanci applicati all'interno del medesimo ambiente: versante con copertura forestale.....	99
	C) Differenze emerse dalla riduzione dei lanci in ambienti opposti.....	105
5.3.2.	Scenario 2: Analisi dell'effetto della foresta contro l'evento di rockfall applicato in circostanze opposte (ante e post disturbo).....	112
5.3.3.	Scenario 3: Analisi dell'effetto della scabrezza del suolo nell'evento di rockfall.	117
	A) Effetto dell'incremento dei parametri MOH nello stesso ambiente.	117
	B) Confronto dell'effetto dell'incremento dei parametri MOH tra tipologie opposte di ambiente.	125
	DISCUSSIONE E NOTE CONCLUSIVE.....	135
	BIBLIOGRAFIA.....	139

Indice delle figure

Figura 1: Elementi interni al rilievo e fattori atmosferici a favore dell'innesco di rockfall	18
Figura 2: Interpretazione della traiettoria di caduta secondo Rockyfor3D su base DEM.	35
Figura 3: Interpretazione grafica del cambio nelle traiettorie di caduta in seguito al rimbalzo, secondo Rockyfor3D.....	36
Figura 4: rappresentazione schematica della dinamica di caduta del masso lungo il versante, in considerazione dell'andamento parabolico	37
Figura 5: schematizzazione della struttura del terreno ai fini dell'interpretazione dell'indice MOH: definizione delle altezze degli ostacoli a seconda della loro frequenza del 70%, 20% e 10% di distribuzione sul versante.	38
Figura 6: elaborazione digitale di un modello di andamento del terreno e della sua copertura forestale...	40
Figura 7: curva del potenziale energetico massimo dissipabile (kJ) da conifere e latifoglie in rapporto al valore di DBH (cm).	52
Figura 8: suddivisione della circonferenza del tronco in relazione alle possibilità di impatto.....	53
Figura 9: livello di energia cinetica del masso (%) dissipabile dalla pianta in relazione al punto di collisione sulla circonferenza del tronco.	54
Figura 11: massi depositati in zona di trasporto e blocchi rocciosi di maggior volume, giunti fino al piede del versante.	65
Figura 12: effetto delle entità dei danni sul popolamento.	79
Figura 13: distribuzione dell'andamento delle lesioni per classe diametrica.	80
Figura 14: grafico delle percentuali dei decessi per ogni classe diametrica.....	81
Figura 15: distribuzione della mortalità per categoria di danno in relazione alle classi diametriche.....	82
Figura 16: distribuzione degli elementi sopravvissuti per ogni classe diametrica in relazione all'entità di danno riscontrato.	83
Figura 17: Valori di massima dissipazione dell'energia riguardanti il popolamento direttamente interessato dal crollo.	83
Figura 18: immagini di blocchi rocciosi rilevati sul sito.....	84
Figura 19: esito delle collisioni con massi di volume inferiore ad una tonnellata.	86
Figura 20: esito delle collisioni con massi di volume tra 1 e 2 tonnellate.....	86
Figura 21: esito delle collisioni con massi di volume tra 2 e 3 tonnellate.....	86
Figura 22: esito delle collisioni con massi di volume tra 3 a 10 tonnellate.....	87
Figura 23: esito delle collisioni con massi di volume da 10 a oltre 50 tonnellate.....	87
Figura 24: effettiva area sorgente del crollo di roccia e corrispettiva zona individuata sul raster delle aree sorgenti.	89
Figura 25: Raster finale risultato delle simulazioni di crollo. Confronto dell'energia media dell'evento..	90
Figura 26: distribuzione delle velocità e raster Nr_passages	94
Figura 27: sviluppo dei depositi nel raster <i>Rvol.asc</i> per le simulazioni R01 senza copertura forestale a 10 lanci e 100 lanci.	96
Figura 28: evoluzione del crollo simulato in R01 senza foresta a un lancio e confronto con la situazione reale del sito.....	97
Figura 29: andamento della frequenza degli impatti masso-foresta.	100
Figura 30: evoluzione delle altezze di rimbalzo dei massi in caduta nelle simulazioni R01 con foresta, prodotte a 100 lanci, a 10 lanci e ad un lancio.....	104
Figura 31: distribuzione del numero di passaggi per le simulazioni R01 senza foresta e R01 con soprassuolo prodotte a 100 lanci.	107
Figura 32: andamento delle velocità nelle simulazioni R01_senza foresta e R01_foresta normal e ad un lancio.	110
Figura 33: evoluzione del crollo di roccia per le simulazioni dello Scenario 1	111

Figura 34: evoluzione dell'andamento delle velocità in relazione alla morfologia del versante nelle simulazioni R02 foresta disturbata e R02 foresta normale	114
Figura 35: andamento del raster <i>Nr_passages.asc</i> nelle simulazioni R02 foresta disturbata e R02 foresta ante-disturbo.	116
Figura 36: evoluzione del crollo di roccia nella simulazione R02.	117
Figura 37: immagine tratta dal raster <i>Ph_mean.asc</i>	121
Figura 38: estratto della zona di arresto e della repentina dissipazione energetica dei massi a fine corsa.	123
Figura 39: simile distribuzione ma differente frequenza di impatti della zona di trasporto in R03_III e R03_II.	124
Figura 40: effetto della scabrezza del suolo in presenza di forestale normale.	125
Figura 41: dettaglio della zona di arresto con deposizioni in prossimità dei decrementi di pendenza del versante in corrispondenza dell'aumento di rugosità del terreno.	127
Figura 42: raster <i>Ph_mean.asc</i> di R04 al III livello di scabrezza;	131
Figura 43: sovrapposizione delle aree delle <i>Reach probability</i> 10% di R04 e R03 al III livello di scabrezza.	132
Figura 44: evoluzione del crollo nelle simulazioni R03 e R04.	133

Indice delle tabelle

Tabella 1: deviazione delle traiettorie in relazione alle velocità di caduta dei blocchi di roccia rispetto alla linea di massima pendenza.	36
Tabella 2: parametri standard di protezione delle foreste.	53
Tabella 3: analisi statistica della risposta all'impatto contro la pianta: dissipazione dell'energia cinetica come probabilità (%) di deviazione della traiettoria.	54
Tabella 4: censimento delle condizioni della copertura forestale al momento del rilievo.	78
Tabella 5: censimento per livelli di gravità delle lesioni alla vegetazione.	79
Tabella 6: organizzazione delle classi diametriche all'interno del popolamento.	80
Tabella 7: elenco degli individui arborei lesionati e rispettivo masso.	85
Tabella 8: parametri di output della simulazione R01_senza foresta_100 lanci.	92
Tabella 9: parametri di output della simulazione R01_senza foresta_10 lanci.	94
Tabella 10: parametri di output della simulazione R01_senza foresta_1 lancio.	96
Tabella 11: parametri di output della simulazione R01_foresta_100 lanci.	99
Tabella 12: parametri di output della simulazione R01_foresta_10 lanci.	101
Tabella 13: parametri di output della simulazione R01_foresta_1 lancio.	102
Tabella 14: parametri di output delle simulazioni R02_foresta disturbata e R02_foresta normale.	113
Tabella 15: parametri di output della simulazione R03_foresta normale_I livello di scabrezza del suolo.	118
Tabella 16: parametri di output della simulazione R03_foresta normale_II livello di scabrezza del suolo.	119
Tabella 17: parametri di output della simulazione R03_foresta normale_III livello di scabrezza del suolo.	122
Tabella 18: parametri di output della simulazione R04_suolo nudo_I livello di scabrezza del suolo.	125
Tabella 19: parametri di output della simulazione R04_suolo nudo_II livello di scabrezza del suolo.	128
Tabella 20: parametri di output della simulazione R04_suolo nudo_III livello di scabrezza del suolo.	130

RIASSUNTO

I fenomeni di crollo di roccia e caduta massi (*rockfalls*) sono per le zone montane eventi naturali avversi, potenzialmente mortali e lesivi per la popolazione e le sue infrastrutture, caratterizzati dal rilascio istantaneo di forti quantitativi di energia che impattano al suolo rovinosamente.

La loro pericolosità è direttamente aggravata dall'altissimo livello di imprevedibilità del momento di innesco del crollo dei massi: 31 maggio 2006, due morti lungo l'autostrada A2 presso Gurnellen (Svizzera); 5 ottobre 2010, autista morto per le ferite riportate in seguito alla caduta di un masso lungo la statale 45 (Piacenza); 4 settembre 2012, due cacciatori morti investiti dal crollo di massi durante una battuta presso Canton Vallese (Alpi Pennine; CH); 16 gennaio 2014, treno intercity Milano-Ventimiglia deragliato con a bordo circa 200 passeggeri, 5 feriti (Imperia); 21 gennaio 2014, fienile raso al suolo da un blocco di 75 metri cubi e uno di 160 arrestatosi a pochi metri dall'abitazione adiacente (Termeno, BZ); 8 febbraio 2014, treno turistico da Nizza a Digne-les-Bains esce dai binari colpito da un masso di 34 tonnellate, 2 morti e 9 feriti (Alpi dell'Alta Provenza, Francia).

A partire dal 1980 molti ricercatori si sono dedicati allo studio di suddetto fenomeno, al fine di comprenderne le dinamiche di innesco e di evoluzione, per arrivare a produrre metodi analitici in grado di prevedere l'avvenuta dei *rockfalls* e il loro sviluppo.

Nel corso degli studi è però emersa la già ben nota attitudine delle foreste alla protezione idrogeologica del territorio, con particolare riguardo alla difesa contro i crolli di roccia attraverso le sequenze di impatti ed urti tra massi in caduta libera e vegetazione.

L'approfondimento di suddetto argomento ha portato al concepimento di *Rockyfor3D*, un sistema di analisi spaziale dei *rockfalls*, che tiene conto dell'azione protettiva della foresta, basandosi sulla simulazione tridimensionale di crolli rocciosi a partire da modelli digitali del terreno.

Successivamente ad una serie di crolli verificatisi in zona prealpina, è stato pensato di applicare *Rockyfor3D* all'analisi dell'effetto della foresta in riferimento agli eventi di rockfall in ambiente dolomitico, mediante l'approfondimento di un caso di studio che ha recentemente interessato un popolamento di pino silvestre, presso il versante australe del monte Antelao (Vodo di Cadore, BL). Lo studio si è sviluppato tramite rilievi di campo per la raccolta di informazioni utili alla produzione di una serie di simulazioni tridimensionali dell'evento a partire dal modello di elevazione digitale del terreno (DEM) a risoluzione 1 metro, necessarie ad una dettagliata analisi del fenomeno di crollo. L'applicazione del modello *Rockyfor3D* ha permesso di determinare l'evoluzione del crollo esaminandone tre diversi aspetti: sono stati approfonditi in particolar modo il contributo allo sviluppo dei crolli apportato dalla forza di gravità, fattore

determinante nei casi di *rockfalls*; l'azione protettiva offerta dalla copertura forestale mediante l'effetto barriera mosso in opposizione alla discesa a valle dei blocchi di roccia ed infine, il ruolo della scabrezza del suolo nella dissipazione delle energie cinetiche dei massi in movimento.

L'obiettivo dello studio è stato raggiunto mediante la realizzazione di 14 simulazioni di crollo che hanno rappresentato l'evento in circostanze diverse; i *rockfalls* simulati hanno interessato il medesimo versante, sia in assenza di soprassuolo che in presenza di copertura foresta in buono stato (ante-disturbo) e in condizioni di forte stress (post-disturbo); l'evoluzione del crollo è stata confrontata applicando un diverso quantitativo di sedimento liberato e realizzando simulazioni a diverso grado di scabrezza del suolo, sia in presenza di vegetazione che su suolo nudo. Inoltre, proposte di crollo contro copertura foresta in circostanze ante-disturbo e post-disturbo hanno permesso di risalire all'effetto della vegetazione sull'arresto dei massi.

Successivamente ad un raffronto con la condizione reale del caso di studio è stato possibile risalire alle caratteristiche di dinamica del evento di crollo rilevato e all'effetto della morfologia del versante sullo sviluppo della caduta dei massi, escludendo le simulazioni fuorvianti, grazie all'individuazione dei parametri inadeguati alla realizzazione tridimensionale del crollo rispetto alla situazione reale.

È stato ampiamente dimostrato l'effetto mitigatore della componente forestale, in grado di produrre eventi di intensità minore, sviluppati su superfici più ridotte; il potenziale energetico dei massi correlato alla forza di gravità ha assunto valori tali da richiedere la riduzione del numero di sedimento liberato, al fine di ottenere simulazioni pertinenti alla realtà del caso di studio, mentre le analisi delle simulazioni prodotte a livelli crescenti di scabrezza hanno dimostrato nel suolo capacità di dissipazione delle energie paragonabili a quelle della foresta.

SUMMARY

Rockfalls are adverse events for mountain areas. They can cause the death of people and destroy the infrastructures, as the rock hits the ground with a large amount of energy.

Moreover, rockfalls are very dangerous because it is impossible to predict when they can happen. 31st May 2006, two people died on the Motorway A2 in Gurtellen in Switzerland; 5th October 2010, a man died for the injuries caused by a rockfall on the Motorway 45 in Piacenza; 4th September 2012, two hunters were killed by a rockfall while they were hunting in the Canton of Valais (Pennine Alps, CH); 16th January 2014 Intercity train Milano-Ventimiglia with 200 passengers derailed, 5 people were injured (Imperia); 21st January 2014, a hayloft was destroyed by a 75 cubic meter rock and a 160 cubic meter rock which stopped a few meters from the house nearby (Tramin, BZ); 8th February 2014, a train for tourists from Nice to Digne-les-Bains was hit by a 34 tonne rock and derailed, 2 people died, 9 people were injured (Alpes-de-Haute-Provence, France).

Since 1980 numerous researchers have been studying these natural events to understand the casual mechanism and the evolution of rockfalls and to predict them.

During the researches the well known hydrogeological protection of the ground in the forests through collisions and impacts between rock falling freely and trees was observed. Though a deeper analysis of this phenomenon it was possible to develop *Rockyfor3D*, a model that can be used for simulations of rockfalls in three dimensions.

After a series of rockfalls in the Prealps it was decided to use *Rockyfor3D* to analyse the consequences of rockfalls in the forests of the Dolomites though a careful study of a rockfall in a forest of Scots pines on the southern slope of the Mount Antelao (Vodo di Cadore, BL). The research was developed through field surveys to collect information to create a series of 3D simulations, through the digital elevation model (DEM) with a resolution of 1 meter. The 3D simulations are necessary to analyse the rockfalls in detail. Thanks to *Rockyfor3D* it was possible to analyse three different aspects of the evolution of the rockfall: the influence of gravity, which is determinant in rockfalls, the protective function of forests through the barrier effect against the falling rock and the influence of the roughness of the ground on the kinetic energy dissipation.

The research objectives were reached through the realisation of 14 rockfall simulations that represented the event on the same slope surface in different circumstances, without topsoil and with a forest strata in good condition (pre-disturbance) and in bad conditions (post-disturbance). The evolution of the rockfall was studied using different quantities of unbound sediment, through simulations with different roughness values on forested and non-forested slopes. Moreover, the simulation of rockfalls against a protection forest under pre-disturbance

conditions and post-disturbance circumstances allowed the researchers to understand the influence of trees to stop the rocks.

Through the comparison with the real condition of the case study, it was possible to understand the dynamics of the observed event and the effect of the morphology of the slope on the development of the rockfall and to exclude misleading simulations thanks to the identification of parameters which are inadequate for the realization of a three-dimensional simulation of the rockfall of the real situation.

The researches have demonstrated the mitigation of the forests, which produces less intense events on smaller surfaces. The potential energy of the rock related to gravity has reached values that needed the reduction of unbound sediment to obtain simulations which were more pertinent to the reality of the case study. The analysis of the simulation with higher roughness values showed the energy dissipation in the soil, which can be related to the one in the forest.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni gli ambienti dolomitici sono stati interessati da un numero crescente di improvvisi eventi di crollo, in gran parte verificatisi nelle località montuose del bellunese. Tra i più rilevanti, in ordine di tempo si possono ricordare il crollo di Cima Una, presso le Tre Cime di Lavaredo (Val Fiscalina, Dolomiti di Sesto, BZ) nel giorno 12 ottobre 2007, smottamenti delle pareti della croda Marcora nel gruppo del Sorapis (Cortina d'Ampezzo, BL) nei giorni 1 e 25 ottobre 2013, sulla Cima Su Alto del monte Civetta (Zoldo, BL) il giorno 16 novembre 2013 e lungo il versante sudoccidentale del monte Antelao (tra San Vito e Borca di Cadore, BL) nel giorno 22 novembre 2013.

Tali fenomeni non rappresentano una novità per i versanti alpini, i quali per naturale orogenesi e composizione geomorfologica sono suscettibili allo sfaldamento e al deterioramento nel corso del tempo (basti pensare, ad esempio, al crollo di una delle guglie delle Cinque Torri, sopra Cortina, avvenuto in data 1 giugno 2004).

La liberazione di sedimento può assumere diverse conformazioni, dalla frana al crollo di grossi blocchi di roccia fino a forme di detrito disciolto (*debris e mud flow*) in presenza d'acqua.

Nonostante i quantitativi di detrito liberato che possono spingersi da pochi metri cubi di roccia a volumi superiori a 100.000 metri cubi, la loro pericolosità è particolarmente legata all'impossibilità, nella maggior parte dei casi, di prevederne l'innescò in tempi utili, elemento che mette in serio pericolo la popolazione (dal turista al cittadino) e le sue infrastrutture.

Correlato probabilmente ai cambiamenti climatici, l'aumento dei fenomeni di crollo nell'ultimo secolo ha indotto molti studiosi all'approfondimento di tale argomento, che ha visto accrescere l'importante effetto di protezione operato dalle foreste contro i *rockfalls*.

Sostenuta dall'esigenza di adottare misure di prevenzione valide ma sempre più economiche e in linea con le normative ambientalistiche, in ambito di sicurezza la foresta ha dimostrato un potenziale di difesa paragonabile a molte opere ingegneristiche, mediante lo sfruttamento dei processi ecologici, con protezione fisica ed ambientale dei versanti.

1.1. CLASSIFICAZIONE DEI MOVIMENTI FRANOSI

La tipicità dei rilievi alpini è la manifestazione dell'interazione di numerosi fenomeni di modellazione dei versanti, dove rocce e terre subiscono gli effetti erosivi degli agenti atmosferici e dei fenomeni gravitativi.

Secondo le NORME UNI (2007) - *opere di difesa dalla caduta massi* – l'evento di crollo viene identificato come fenomeno franoso che comporta il distacco di blocchi e/o frammenti rocciosi di dimensioni variabili (da alcuni decimetri a diverse centinaia di metri cubi) da pendii o fronti di scavo ed il loro successivo movimento (per caduta libera, rimbalzo, rotolamento, scivolamento) lungo il versante fino all'arresto.

Con il termine di movimenti franosi vengono generalmente identificati fenomeni di massa coinvolgenti rocce, detriti o terre, attraverso i quali si manifesta la tendenza da parte di un corpo solido al raggiungimento di un minimo di energia potenziale [Varnes, 1978].

Il distacco, al principio, e il successivo movimento dei volumi di roccia coinvolti sono determinati essenzialmente da un unico campo di forze, ossia l'attrazione gravitazionale.

Agli sforzi gravitativi, le rocce oppongono in generale resistenza al taglio, attraverso le forze di attrito meccanico che si generano lungo i piani di rottura e scorrimento (coefficienti di attrito interno) e alle forze di legame tra gli elementi costituenti le rocce (coesione del materiale).

Classificare tali fenomeni risulta opera molto complessa, in quanto sono caratterizzati da un articolato range di variabili, alcune delle quali apparentemente dettate dalla casualità.

Di fatto, è stata ampiamente dimostrata la loro stretta correlazione alla presenza di acqua, sia come elemento d'innescò che come solvente liquido del soluto (terre e detrito roccioso fine).

Una prima distinzione dei fenomeni franosi è attribuibile sulla base dei materiali coinvolti [EPOCH, 1991], ossia roccia, terra, detrito:

- **roccia:** (*bedrock*) aggregato naturale di granuli o minerali legati da elevata coesione (cementati); suddetta caratteristica non viene perduta dopo essiccamento o prolungata immersione. Solitamente le rocce sono interessate da piani di discontinuità che ne influenzano profondamente il comportamento meccanico dell'intero ammasso di appartenenza, in quanto ogni piano risulta essere un punto locale a minor coesione, maggiormente soggetto quindi alla frattura;
- **terra:** (*earth*) mezzo granulare multifase, ovvero costituito da una matrice di grani di minerali in contatto tra di loro, nei cui pori possono presentarsi particella sia d'acqua che d'aria. La presenza e il quantitativo di aria e acqua influenzano direttamente la coesione delle terre.
- **detrito:** aggregato naturale di grani minerali; può presentare diversi gradi di cementazione tra gli elementi della matrice; è noto come *debris* se costituito da

materiale prevalentemente grossolano (20%-30% di granuli con dimensioni maggiori di 2 mm), ma può passare alla forma di *earth* nel caso in cui il 70%-80% delle particelle assumano valori inferiori a 2 mm.

In caso di movimento, la composizione del corpo di frana influenza pesantemente l'evoluzione del fenomeno; all'aumentare della coesione interna, ossia al passaggio da terre e detrito fine verso la roccia, si potranno distinguere le seguenti forme di franamento:

- complesse
- colamenti
- espansioni laterali
- scivolamenti
- ribaltamenti
- crolli (*falls*)

1.2. CROLLI DI ROCCIA E CADUTA DI MASSI

Gli eventi di crollo di massi o di roccia (*rockfall*), sono accomunabili ad una sorta di fenomeno di frana o valanga di materiale roccioso a carattere prettamente gravitativo, aventi origine dal distacco di materiale litoide presso la superficie di pareti rocciose verticali o sub-verticali [Selby, 1992] con l'improvviso rilascio di volumi rocciosi che discendono lungo il pendio.

Nel caso in cui la caduta interessi il movimento verso valle di blocchi rocciosi perlopiù isolati e volumetricamente limitati (compresi tra 0.02 m³ fino a 5 m³) si tratterà più propriamente di crollo di massi.

Il crollo di roccia non è una comune forma di frana in quanto si contraddistingue per il distacco e la successiva caduta di un masso, o di più massi, che interessano una singola porzione di roccia, dove il comportamento dinamico delle singole porzioni è sostanzialmente indipendente l'una dalle altre.

Inoltre, a differenza di quanto viene a verificarsi in caso di frana, nei rockfalls le dimensioni degli elementi di roccia in movimento sono solitamente contenute rispetto alle altre caratteristiche geometrico-spaziali dell'evento di disturbo, come il dislivello o la lunghezza del percorso di caduta.

Con un potenziale distruttivo a scala variabile, generalmente non assumono magnitudo elevate (i tempi di ritorno ridotti dei versanti più esposti ne abbassano la pericolosità) ma in taluni casi possono evolvere in pericolose forme di *debris flow* [Hsu, 1975] ed arrecare severi danni alle infrastrutture e alla popolazione; risultano essere infatti tra i fattori di rischio geologico più frequenti nel territorio nazionale e in particolar modo negli ambienti alpini.

La loro pericolosità dipende sostanzialmente dall'impossibilità di prevederne con esattezza l'avvenuta, con possibili gravi conseguenze per l'incolumità della popolazione.

A tale proposito gli eventi di rockfalls rientrano nella categoria delle frane attive, indipendentemente dalla manifestazione di movimento entro l'arco di tempo stagionale minimo.

1.2.1. FATTORI PREDISPONENTI E AGENTI D'INNESCO DEL CROLLO

Per quanto riguarda i crolli di roccia molte delle cause innescanti sono riconducibili a meccanismi in grado di determinare la rottura delle forze coesive interne alle rocce agendo sui piani di debolezza strutturale favorevolmente orientati, ossia soggetti all'azione gravitativa, mentre per la caduta di massi il problema è dovuto ad un disequilibrio dovuto ad influenze interne ed esterne al pendio, subordinato comunque alla forza di gravità.

Fra questi sono stati evidenziati i seguenti fattori predisponenti (Figura 1):

- **Morfologia del rilievo:** pendenza (inclinazione versante, altezza della nicchia di distacco, profilo), esposizione, forma del rilievo (modellamento operato dai processi erosivi);
- **Geologia:** tipi di rocce, variabilità della struttura geologica, substrato detritico, tipologia di deposito, distribuzione e orientazione;
- **Scistosità:** grado di fessurazione, piani di fessurazione, localizzazione e orientazione;
- **Proprietà geomeccaniche delle rocce e del suolo:** coesione, attrito, resistenza al taglio, angolo di deposito;
- **Attività:** movimenti del *rockfall* antichi;
- **Idrogeologia:** permeabilità dell'acqua ed effetti collaterali (espansione, diminuzione della coesione);
- **Clima:** escursione termica e ciclo gelo-disgelo.

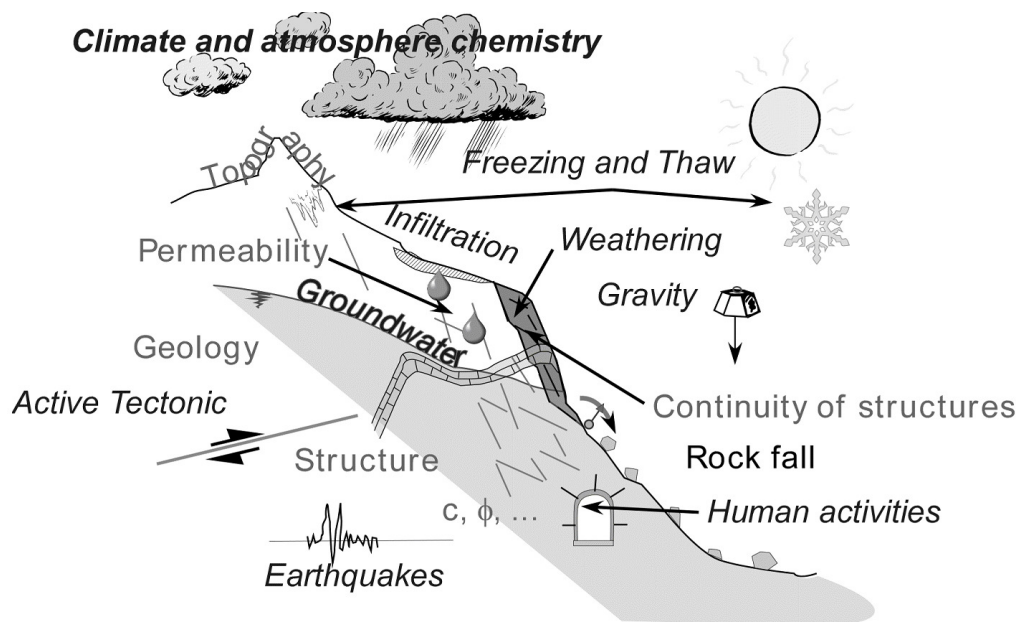


Figura 1: Elementi interni al rilievo e fattori atmosferici a favore dell'innescò di rockfall [Volkwein et al., 2011].

Gli Autori Schumm e Chorley (1964) hanno riconosciuto come causa principale di tali eventi le condizioni chimico-fisiche della roccia che compone i versanti di distacco, suscettibili dell'azione disgregativa operata dagli agenti atmosferici.

In particolar modo, di notevole rilevanza sembra essere il passaggio gelo-disgelo in pareti rocciose caratterizzate da elevata pendenza e scistosità concorde al moto gravitativo [Grove, 1972; Porter e Orombelli, 1980-1981; Coutard e Francou, 1989; McCarrol et al., 1998, Matsuoka e Sakai, 1999].

Il distacco di rockfalls trova innescò anche in seguito a movimenti sismici e attività tettonica [Broili, 1974]; ulteriori elementi favorevoli al distacco sono stati individuati negli scalzamenti dei piedi del versante per opera di alvei fluviali e l'azione degli apparati radicali della vegetazione (sia per spinta meccanica della radice che per emissione di sostanze chimiche acide in grado di disgregare le rocce), mentre la presenza di animali e uomo rappresenta una causa scatenante di valore minimo [Selby, 1982].

1.2.2. DINAMICA DEL MOVIMENTO ED EVOLUZIONE DEL FENOMENO

Come avviene per numerosi altri eventi di disturbo è possibile identificare anche per il crollo di roccia le tre aree in cui si manifesta il fenomeno: area di origine o zona di innesco, zona di transito e zona di arresto. Tale operazione risulta però molto più complessa per quanto concerne i *rockfalls*, in quanto non sono ben evidenziabili i confini tra innesco, transito e arresto, dal momento che durante il crollo le forze in gioco causano una continua sovrapposizione di aree sorgenti, zone di arresto parziale dei volumi rocciosi, con ripresa del movimento in seguito ad urti ed incrementi delle pendenze.

Generalmente si possono assegnare i termini di:

- 1) **area sorgente/zona di innesco:** ripide pareti rocciose che presentano combinazioni avverse nell'aspetto e nella pendenza, con costoni a strapiombo e piani di stratificazione sfavorevoli;
- 2) **zona di trasporto:** localizzata tra l'area di origine della frana e l'area di deposito. In tale superficie le velocità di caduta dei massi e le altezze di salto presentano i valori massimi;
- 3) **area di deposito/zona di arresto:** è riconoscibile per il maggior quantitativo di materiale depositatosi al suolo in seguito al crollo; talvolta diviene fonte di ulteriori inneschi, originando secondari *rockfalls*.

1.2.2.1. DISTACCO

A seguito della rottura dei piani di debolezza delle rocce o per cessazione dell'azione compiuta dalle forze coesive all'interno della parete rocciosa, dominato dall'effetto della gravità, il distacco si esprime con la liberazione a valle di materiale litoide dal versante, di n elementi di roccia definiti da specifica forma, massa e volume individuale, generalmente da 1 a 100.000 metri cubi per le tipologie di dissesti più comuni.

Ciò si verifica in presenza di:

- sussistenza sul pendio di blocchi separati dal resto dell'ammasso (direttamente collegato alla presenza di discontinuità più o meno accentuate del versante);
- inclinazione del pendio tale da rendere instabili i blocchi (effetto gravitazionale);
- presenza di una forza esterna in grado di dare origine al dissesto.

Come indicato precedentemente, il rilascio può assumere diverse volumetrie e quantitativi variabili di materiale crollato:

- blocchi rocciosi isolati, di volumetria limitata (caduta di massi);
- crollo massivo di rocce (*rockfall*) di dimensioni variabili, con comportamento indipendente degli elementi caratterizzanti l'ammasso.

Crosta (2000) ha proposto una classificazione dei fenomeni di crollo secondo i volumi coinvolti, sviluppata come segue:

- *Boulder fall*: inferiore a 10 metri cubi;
- *Blockfall*: superiore a 100 metri cubi;
- *Cliff fall*: tra 10^4 e 10^6 metri cubi;
- *Bergsturz (rock avalanche)*: superiore a 10^6 metri cubi.

1.2.2.2. MOVIMENTO

Avvenuto il distacco dalla parte, ad assumere il controllo dell'evento rimane la forza di gravità che, a prescindere dalla dimensione del blocco, conduce il detrito liberato ad intraprendere un movimento di discesa a valle, verso la zona a minor potenziale cinetico.

Generalmente la discesa a valle si verifica attraverso la combinazione di una serie di movimenti, distinguibili in:

- **caduta libera**, ove vi siano versanti con pendenze maggiori di 76° [Ritchie, 1963], atte ad indurre i massi verso una traslazione orientata al loro baricentro e, successivamente, ad una rotazione attorno ad esso [Azzoni et al., 1995]. Prettamente governata dalla gravità, rappresenta

la componente di moto più frequente dei *rockfalls*, dove l'energia potenziale del masso si tramuta in energia cinetica, attraverso la manifestazione di traiettorie paraboliche in aria, ad elevate velocità;

- **rimbalzo e rotolamento**, al momento della collisione con il piede del pendio, un cambio di pendenza del versante in corrispondenza di sporgenze della parete o contro altro detrito roccioso; in seguito a tali impatti generalmente il masso si frantuma e perde circa il 75% della sua energia iniziale, raggiungendo livelli dell'86% [Broili, 1974, Evans e Hungr, 1993].

In versanti particolarmente scoscesi il masso continua la discesa esplicando contatti minimi con la parete rocciosa, ossia compiendo una o più successioni di salti in aria, mentre al di sotto dei 45° il movimento assume una maggior aderenza alla superficie, tramutandosi in rotazione.

Insieme al rimbalzo il rotolamento è il tipo di movimento maggiormente riscontrato negli eventi di *rockfalls* [Broili, 1974], in presenza di pendenze inferiori ai 30° e versanti con rugosità tale da non ostacolare il movimento di discesa. L'azione del masso che rotola trova massima espressione lungo pendii caratterizzati da una copertura detritico-ghiaiosa con elementi angolosi di dimensioni comprese tra i 5 e i 30 centimetri. Quest'ultimo, secondo Erismann (1986) è il moto che permette al blocco roccioso di mantenere intatta l'energia cinetica e raggiungere così le maggiori distanze di arresto sul rilievo, ma si verifica di rado e quasi esclusivamente solo in presenza di massi di forma sferica e/o ovale, su pendii caratterizzati da scabrosità bassa o nulla.

- **scivolamento/slittamento**, in presenza di bassa energia o pendii dolci, quindi al principio del movimento di discesa o in ultima fase al momento dell'arresto, quando la forza di attrito è tale da non poter essere vinta dal masso [Bozzolo e Pamini, 1986]. Si verifica entro brevi distanze (da pochi centimetri a qualche metro) in quanto la bassa velocità che lo caratterizza comporta il maggior dispendio di energia al masso.

- **arresto**, influenzato da velocità (direttamente proporzionale al grado di pendenza del versante), dimensione e forma del frammento di roccia, nonché dalla composizione della superficie del pendio (tipologia di suolo, presenza e quantitativo di detrito depositato, rugosità del versante ed esistenza di una copertura vegetazionale); tali sono i principali elementi in grado di determinare la dissipazione dell'energia, ossia l'arresto del masso e il suo deposito, al momento in cui l'opposta forza di attrito incontrata nella discesa è superiore alla movimentazione verso valle.

Manifestazione tipica di suddetto evento è la distribuzione dei frammenti rocciosi: per effetto del carico potenziale del masso, blocchi di dimensioni più contenute avranno un minor livello di energia cinetica e di conseguenza subiranno maggiormente l'effetto dell'attrito dinamico tra litoide e superficie del versante, nonché il range di pendenze in

gioco [Pfeiffer e Brown, 1989], arrivando ad arrestarsi molto prima rispetto ai grossi frammenti, in grado di raggiungere anche il fondo valle [Evans e Hungr, 1993].

Nonostante in letteratura vi siano numerose documentazioni relative al fenomeno di *rockfall*, non è ancora ben chiara la dinamica di trasporto dei detriti ghiaiosi e la loro deposizione lungo i tratti in pendenza e il ruolo effettivamente svolto dalla presenza di foreste nei siti disturbati.

1.3. PRINCIPI FISICI E MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI CROLLO

A differenza di quanto avviene per le manifestazioni di disturbo, quali valanghe, frane, smottamenti e colate di detrito, lo studio della dinamica di sviluppo degli eventi di crollo di roccia incontra alquanto difficoltà per la molteplicità di moti e componenti di casualità che caratterizzano tale fenomeno, nonché la difficoltà di ottenere riscontri pratici in campo e verifiche in laboratorio.

Al fine di superare suddetto inconveniente, nel corso degli anni (a partire dalla prima metà del secolo scorso) sono stati proposti una serie di modelli analitici capaci di produrre approssimazioni fisiche dei processi di crollo di litoide, basata sull'analisi geomeccanica dei principali fenomeni gravitativi evidenziati durante il *rockfall*.

È stato dimostrato che all'innesco del *rockfall*, si assiste ad una discesa a valle del materiale roccioso caratterizzata da più variabili di movimento e modificazioni a più riprese anche durante il percorso: i blocchi avanzano rotolando, rimbalzando o scivolando sul pendio, cambiano forma e velocità, successivamente ad impatti e urti contro la parete o altri ostacoli [Ritchie, 1963].

Varie interpretazioni sono state proposte al fine di sintetizzare e procedere ad una descrizione analitica ed univoca dei fenomeni di crollo; a seconda dei parametri analizzati sono stati elaborati i seguenti modelli:

A) Basati sulla Dinamica del movimento:

- 1) Crollo/caduta libera;
- 2) Rimbalzi;
- 3) Rotolamenti;
- 4) Scivolamenti;
- 5) Impatti ed urti;

B) Basati sulla **Ricostruzione cinematica (modelli)**:

- 1) Metodo cinematico a composizione di moti;
- 2) Metodo della meccanica del corpo rigido;
- 3) Modello empirico;
- 4) Modello semplificato;
- 5) Modelli DEM e GIS.

1.3.1. MODELLI DI DINAMICA DEL MOVIMENTO

I modelli fondati sulla dinamica del movimento analizzano il moto di caduta del masso scomponendolo nelle sue variabili (rimbalzo, scivolamento, rotolamento, urti e impatti), determinando per ogni voce una descrizione fisico-matematica dell'azione compiuta dal masso.

1.3.1.1. CROLLO E CADUTA LIBERA

È questo l'unico processo in cui la caduta libera è dominata esclusivamente dalla componente verticale della gravità e termina con l'impatto al suolo (base della scarpata o apici delle conoidi detritiche ai piedi dei rilievi) o con impatti intermedi (su gradinate o sporgenze della parete) dei massi in volo.

Generalmente con la fine della caduta libera gran parte dell'energia cinetica del masso viene dissipata attraverso le deformazioni della superficie di impatto e/o dai fenomeni di fatturazione dei blocchi.

Nella caduta libera, come nel rimbalzo, il moto nell'aria, a prescindere dalla forma del masso, corrisponde ad una caduta nel vuoto, dove la velocità viene semplificata in:

$$v = \sqrt{v_o^2 + 2g \cdot h} \quad [1]$$

Dove: v : velocità del masso in caduta (ms^{-1}); v_o^2 o v_o : velocità iniziale (trascurabile) (m/s); g : forza di gravità ($9,81$) (m/s); h : altezza di caduta libera.

Tale formula è indipendente però dal fattore di forma che caratterizza ogni singolo litoide e che ne determina la distanza di arresto; è possibile quindi ampliare la [1] inserendo la componente di attrito dell'aria:

$$v = \sqrt{\frac{m \cdot g}{k \cdot A \cdot f}} \quad [2]$$

Dove: v : velocità critica del masso in caduta (m/s); $m \cdot g$: forza peso (kg); k : coefficiente di attrito dell'aria ($0,08 \text{ kg/m}^2$), [Eiffel, 1910]; A : area del masso (m^2); f : coefficiente variabile di forma.

Raggiunto il piede del versante, il litoide può impattare al suolo o su di un ostacolo presente; hanno così inizio una serie di interazioni tra il masso, individuabile come corpo rigido, e il pendio; generalmente, dopo il primo forte urto prodotto dalla caduta libera, i massi tendono ad esaurire tutta la loro energia e a depositarsi quindi alle pendici del rilievo, partecipando alla creazione di un nuovo profilo multilineare, elemento distintivo dei rockfall; in altri casi invece i frammenti possono proseguire nella discesa lungo il pendio attraverso ulteriori rimbalzi, rotolamenti e scivolamenti prossimi alla superficie.

1.3.1.2. RIMBALZI

Nel caso in cui il masso non esaurisca la sua energia cinetica, dopo il contatto con il suolo è in grado di urtare la superficie del versante e riacquistare potenziale, agevolato da forma sferica o ellissoidale della massa, volumi elevati e specificità della superficie del rilievo (pendenze superiori ai 35°, stratificazione dei detriti, geologia del suolo).

I rimbalzi sono eventi di carico rapido in cui gli spessori superficiali dei blocchi rocciosi vengono sottoposti a sollecitazioni alle quali rispondono in base alle proprie caratteristiche di compressibilità, in relazione alle condizioni dinamiche al contorno del contatto tra suolo e roccia.

Normalmente si tratta di rimbalzi a carattere anelastico, in cui i parametri cinematici vengono determinati dalla velocità iniziale [1], che diventa un valore fondamentale, insieme alla localizzazione geografica del masso e all'angolo di proiezione della sua traiettoria.

1.3.1.3. ROTOLAMENTI

A livello cinetico il rotolamento rappresenta per il masso il moto maggiormente efficiente per arrivare alla più distante runout, mediante uno "scorrimento" sulla superficie del versante intorno al baricentro del litoide.

I fattori che influiscono sulla dinamica di summenzionato moto sono stati elaborati servendosi dei concetti di cinematica della rotazione dei corpi rigidi da Paiola (1978), Bassatococco e Silvano (1985), i quali hanno trovato una valida spiegazione alla velocità di rotazione del fenomeno attraverso l'equazione [3]:

$$v = \sqrt{v_o^2 + \alpha \cdot g \cdot s(\tan \beta - \tan \delta_{rot}) \cos \beta} \quad [3]$$

dove β è l'inclinazione del piano/pendio; δ_{rot} è l'angolo di attrito dinamico al rotolamento; s è la lunghezza del segmento e α è un fattore che dipende dalla forma del masso: pari a 10/7 nel caso di massi associabili ad una sfera piena e 4/3 per massi associabili ad un cilindro pieno.

La V_o può essere invece calcolata come velocità normale V_n attraverso le componenti orizzontali e verticali di caduta del masso, secondo la formula:

$$V_n = V_x + V_y = \sqrt{x^2 + (z + 4f)^2} \sqrt{\frac{g}{8f}} \quad [4]$$

1.3.1.4. SCIVOLAMENTI

Medesima situazione si manifesta ai piedi della parete rocciosa o in tutti i quei siti, dove i fenomeni di arresto/deposito prevalgono sui moti di accelerazione.

Attraverso un approccio geomeccanico, il fenomeno trova risposta nello Sliding Rock Block Model [Pariseau e Vight, 1979], un modello di calcolo che definisce il comportamento del fattore principale determinante il moto di scivolamento: l'accelerazione tangenziale. Attraverso questo sistema è possibile considerare sia i decrementi che gli incrementi di velocità incontrati durante la discesa del materiale roccioso lungo un pendio inclinato. L'accelerazione viene determinata infatti come:

$$a_t = g(\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{SL}) \quad [5]$$

Dove a_t è l'accelerazione tangenziale del blocco (m/s); $\tan \delta_{SL}$ è l'angolo di attrito dinamico dello scivolamento per il sistema blocco-piano

Mediante suddetta accelerazione è possibile calcolare la velocità tangenziale dell'evento in riferimento al tempo, secondo il carattere di moto uniformemente accelerato, oppure come velocità v lineare, in riferimento allo spazio percorso sul versante:

- velocità tangenziale nel tempo t :

$$v = v_0 + g \cdot t(\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{SL}) \quad [6]$$

- velocità lineare nel segmento s :

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2g \cdot s(\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \delta_{SL})} \quad [7]$$

1.3.1.5. IMPATTI ED URTI

Nei rockfall la componente gravitazionale svolge un ruolo chiave nel processo di innesco del fenomeno. È noto che tali eventi sono caratteristici delle zone alpino/montane e per il loro sviluppo richiedono forti gradienti di pendenza.

L'inclinazione del pendio è quindi un fattore fondamentale, in quanto conferisce al masso in caduta libera la sua energia cinetica (minima all'apice del rilievo, massima in prossimità del suolo) dal momento che si trova direttamente correlata all'energia potenziale del blocco.

Lo stesso pendio può determinare però, anche l'esaurimento dell'energia del masso nel momento in cui avviene l'impatto al suolo; quanto detto si verifica poiché l'urto a terra ha la capacità di dissipare totalmente la forza del litoide, che si deposita al suolo o scivola verso valle.

Al contrario, come avviene per il rotolamento, in presenza di versanti caratterizzati da una matrice detritica ben sviluppata, soprattutto se di forma spigolosa, il masso tende ad acquisire energia cinetica che può sfociare in rimbalzi e, di conseguenza, impatti ed urti al suolo o contro ostacoli presenti lungo il cammino.

La severità dell'impatto è frutto delle relazioni di compressione che interessano le proprietà geotecniche del suolo, del masso e la presenza di detrito, rispetto alla resistenza al taglio della superficie del terreno. Di fatto, è proprio quest'ultimo elemento a definire gli effetti di un urto e a rispondere con la frammentazione del blocco di roccia (manifestazione più classica) o la spaccatura del terreno, con eventuale penetrazione del litoide.

Esso aumenta la sua resistenza superficiale in corrispondenza di:

- un aumento della granulometria;
- un accrescimento del quantitativo d'acqua nel terreno;
- un incremento delle velocità di caduta libera del masso.

Le conoscenze di meccanica dei corpi rigidi e le teorie dell'urto sono validi sistemi di analisi degli eventi di impatto; nello specifico identificano due tipologie di forze di impatto più comuni:

- a) impatto normale ed obliquo;
- b) impatto centrale ed eccentrico.

Le due manifestazioni di impatto interessano soprattutto blocchi di roccia con forma approssimabile a prismi irregolari fino a solidi regolari, mobilizzati da pendii detritici costituiti da una successione di variazioni altimetriche della superficie. La collisione può avvenire con o senza coinvolgimento della forza d'attrito, con orientamento del masso secondo il suo asse normale perpendicolare e/o leggermente traslato rispetto al piano orizzontale della superficie (a) oppure innescando il rotolamento del masso dopo l'avvio di un moto nell'aria a carattere eccentrico, in rotazione attorno al baricentro del blocco (b).

La potenza dell'impatto è determinata dall'interazione tra i contorni degli elementi in gioco, ossia masso roccioso e superficie di collisione del versante, secondo tre livelli principali:

- c) contatto puntiforme spigolo-superficie;
- d) contatto ridotto spigolo-superficie;
- e) contatto faccia-superficie;

L'estensione del margine del blocco che impatterà contro il suolo si esprimerà con la tipologia di andamento del moto in risposta all'urto: in presenza di collisioni puntiformi e ridotte il masso acquisirà forza cinetica e potrà essere sbalzato in una qualsiasi direzione con moto più o meno parabolico; al contrario, collisioni faccia-superficie interesseranno maggiori aree di contatto con conseguente dissipazione dell'energia e possibilità di arresto del masso o scivolamento a valle.

Comunemente, per quanto concerne i crolli di roccia, la forza di impatto viene considerata come una forza impulsiva connessa alle caratteristiche geotecniche del suolo, con generazione di urti a diversa dinamica finale:

- urto parzialmente anelastico (frammentazione della roccia e incrinatura del suolo);
- urto anelastico (corpo sprofondato nel suolo).

1.3.2. MODELLI DI RICOSTRUZIONE CINEMATICA

Per la ricostruzione cinematica dei fenomeni di rockfalls sono stati elaborati una serie di modelli atti a descrivere, secondo un certo margine di incertezza, il comportamento dinamico del dissesto roccioso, identificandolo come massa e/o punti materiali in moto su traiettorie prestabilite.

Attraverso un'analisi diversificata dei principali moti che caratterizzano i rockfalls, ogni modello è il frutto di un attento procedimento finalizzato a:

1. Suddivisione del dominio del problema ed identificazione della tipologia di elementi con cui ripartire il sistema;
2. Rappresentazione della deformazione dei singoli blocchi (che possono essere rigidi o deformabili);
3. Sviluppo di un algoritmo per l'identificazione dei contatti;
4. Formulazione delle equazioni del moto del sistema;
5. Integrazione delle equazioni del moto ed aggiornamento dei contatti tra i blocchi, che variano in conseguenza dei movimenti e delle deformazioni cui è soggetto il sistema.

L'impiego di modelli permette di avanzare un'analisi di tipo probabilistico dell'evento, baste su numerose serie di tentativi, al fine di conoscerne il regime del dissesto, ossia:

- massimi volumi mobilizzabili;
- peso volumetrico degli elementi;
- velocità massime e locali;
- traiettorie preferenziali di possibili rimbalzi.

A seconda della tipologia di moto dei massi e dei fattori del rockfall selezionati per i calcoli, ogni metodo seguirà un diverso approccio al sistema, ottenendo risultati orientati verso uno o più obiettivi.

1.3.2.1. METODO CINEMATICO A COMPOSIZIONE DI MOTI

Metodo elaborato considerando complessivamente i fattori di innesco e sviluppo di un crollo di roccia; è l'approssimazione più coerente alla realtà, in quanto valuta più ipotesi di movimento, riuscendo a considerare, oltre alla cinematica di base, anche movimenti complessi come scivolamenti, cadute libere, impatti/rimbalzi e rotolamenti, che soddisfano le condizioni massime di avanzamento lungo il pendio per angoli di attrito compresi tra $22,5^{\circ}$ - $30,9^{\circ}$ e le altezze massime di rimbalzo [Hallabauer, 1986].

Peculiarità del metodo è la considerazione della forza centrifuga, elemento chiave nella dinamica del blocco che rotola e scivola lungo il versante, contributo fornito dagli Autori Hacar

e Bollo (1977) e la possibilità di elaborare meccanismi di crollo a diverse sequenze teoriche [Broili e Bertozzi, 1978]; tra le principali ipotesi degli Autori:

- 1) caduta libera, impatto principale e scivolamento;
- 2) scivolamento, impatto principale e scivolamento;
- 3) esclusivo scivolamento.

1.3.2.2. METODO DELLA MECCANICA DEL CORPO RIGIDO [BRGM, 1984]

Semplificazione che non esamina più la frana come elemento puntuale, bensì ne studia l'influenza della massa e della forma del blocco e l'interazione a carattere geomeccanico che esso manifesta con il pendio e le velocità acquisite, secondo l'algoritmo del metodo degli elementi distinti di Cundall (1971), il quale considera l'ammasso roccioso come un sistema discontinuo, soggetto a condizioni quasi-statiche o dinamiche.

Rispetto al metodo cinematica a composizione di moti è molto più complesso.

Suddetto sistema si distingue per la capacità di valutare il comportamento plastico, elastico, elastoplastico del rockfall, mediante l'implementazione della cinematica e della dinamica (legge forza-spostamento); al blocco di roccia, considerato come corpo rigido indeformabile, vengono attribuite quindi risposte come gli sprofondamenti normali e tangenziali al pendio (contatto faccia-superficie e spigolo-superficie).

La dinamica del corpo rigido richiede come dato di input la definizione di ogni impatto, secondo:

- massa, forma, assetto e velocità;
- criterio dell'urto;
- legge della penetrazione (reazione r della superficie e attrito generale).

Nonostante la complessità di fattori considerati, anche questo metodo non è in grado di fornire una ricostruzione indiscutibile del fenomeno in post-evento.

1.3.2.3. MODELLO EMPIRICO

Analisi sperimentale del fenomeno basata su relazioni statistiche [Keylock e Damaas, 1999] che, tramite funzioni logaritmiche, associano volumetrie massime e distanze massime di arresto alle caratteristiche morfologiche dell'angolo di connessione tra corona di innesco e fine del movimento (piede della runout).

In questo modo, è possibile ricavare il valore dell'energia media sviluppata dal crollo di rocce.

1.2.3.4. MODELLO SEMPLIFICATO

Realizzato dagli Autori Kirkby e Statham (1975), comprende più sottospecie di metodi di rapido approccio, finalizzati alla descrizione o simulazione di rockfalls su versanti in pendenza caratterizzati da uno strato superficiale di detrito; il metodo è particolarmente indicato per le analisi di manifestazione del moto di scivolamento del masso, di rimbalzo e rotolamento.

La linearità del sistema è conferita dal calcolo della velocità ottenuta unicamente come componente di caduta parallela/tangenziale al versante (h):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [8]$$

Dove v : m/s; g : m/s; h : m. In taluni casi è possibile servirsi delle legge di Coulomb e introdurre una forza di attrito tangente alla superficie (F_f):

$$F_f = \mu_f \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta \quad [9]$$

Dove F_f : kg·ms⁻²; μ_f : coeff. di attrito; m : kg; g : m/s; β : pendenza media (angolo).

I modelli appena citati vengono comunemente classificati in 2D, 2.5D e quasi3D, in quanto utilizzano coordinate cartesiane bidimensionali nei calcoli e nell'identificazione della posizione del masso; per questo hanno il difetto di non considerare il movimento di espansione laterale del rockfall, tuttavia sono estremamente efficaci per quanto riguarda la previsione della runout e delle traiettorie paraboliche dei massi e consentono di stimare bene anche l'effetto delle collisioni, con conseguente perdita di energia.

Ad oggi, i modelli 2D stanno evolvendo verso la tridimensionalità, attraverso l'ausilio di tecniche remote sensing, atte a definire l'evento di *rockfall* nella sua totalità.

1.2.3.5. MODELLI DEM E GIS

Questa categoria include i metodi di nuova generazione, ancora non del tutto operativi; sono modelli distribuiti del dato spaziale, ottenuto attraverso database forniti da analisi GIS o raster. Offrono il vantaggio di identificare complessivamente l'area interessata da rockfall e di estrapolarne in dettaglio le caratteristiche (morfologiche, geologiche, ideologiche, copertura del suolo, etc.).

Si basano su analisi empirica di simulazioni dell'evento, ponendo come fattore chiave di sviluppo dei rockfalls la differenza altimetrica del suolo (DEM) o l'angolo di pendenza (raster); di fatto è questo l'elemento che maggiormente influisce sul moto gravitativo del crollo di roccia, manifestandosi lungo le linee di massima pendenza.

GIS-base

Sono i primi metodi utilizzati per il calcolo della falltrack del dissesto roccioso, attraverso l'impiego di dato raster: sviluppati da Meissl intorno agli anni '80, consistono nell'analisi spaziale tramite finestre a matrice 5x5 in grado di elaborare traiettorie di sviluppo dei rockfalls, esaminando l'intorno di celle presso la cella pilota (fino a 8 per *D-8 method*, perfezionato dagli Autori O'Callaghan e Marck nel 1984; fino a 16 per *D-16 method* [Meissl, 1998]).

D.8 method prende come pendenza il minimo angolo d'ombra degli Autori Evans and Hungr (1993), mentre Meissl applica l'angolo della retta tra apice della corona di distacco e limite finale del punto di arresto.

Il metodo D-16, noto anche col nome di Geometrische Gefälle, si è rivelato efficiente per l'analisi a scopo preventivo a scala di bacino e regionale ma ha dimostrato alcuni problemi nella gestione dei dati.

L'individuazione di nicchie di distacco è stata posta per pendii superiori a 60°, con direzione del moto da cella h_{i+1} a h_i , distribuzione delle velocità [Scheidegger, 1975] secondo la legge della conservazione dell'energia, dove:

$$v = \sqrt{v_0 + 2g(h - \mu_f + x)} \quad [10]$$

GIS-DEM

Rappresentano un'ottima categoria di metodi applicativi che permettono di ottenere realistiche ricostruzioni dei dissesti in post-evento.

Si fondano anch'essi sull'inclinazione del versante, calcolato come angolo di pendenza soglia threshold [Guzzetti, 2003] ma valutano attentamente i criteri morfologici del terreno, nonché i fattori che ne determinano l'innescio.

L'approccio GIS-DEM permette di esaminare le discontinuità del suolo e valutarne il criterio di stabilità [Norrish e Wyllie, 1996], attraverso l'interpolazione di informazioni, quali il grado di erosione operato dagli agenti atmosferici e la presenza di umidità [Baillifard, 2004; Oppikofer, 2007]. La ricchezza e variabilità del database disponibile è tale da essere convertita in valide mappe di probabilità di scorrimento, comprensive di traiettorie di rimbalzo, in funzione della rugosità della superficie del terreno.

Lidar-DEM

Comprendono modelli di analisi spaziale basati su fotogrammetria Lidar [Kemeny et al., 2006], di recente sperimentazione.

Permettono di ottenere dettagliate informazioni sulla geomorfologia di un versante, superando i limiti conferiti dall'irraggiungibilità di alcuni siti e alla mole di costi economici a carico delle analisi in campo. Efficienti a scala di bacino, forniscono dati precisi sulla rugosità del suolo, le proprietà della roccia, la posizione e la dimensione delle radure per versanti boschivi; non offrono pari risultati per quanto riguarda lo studio di aree puntuali.

Potenzialmente non ancora sfruttati al meglio, forniranno in futuro un prezioso contributo all'analisi temporale degli eventi di dissesto, consentendo di apprendere la dinamica delle manifestazioni erosive e di frammentazione operati dagli agenti atmosferici [Jaboyedoff et al., 2007] a cui sono soggette le Dolomiti.

2.1. IL MODELLO ROCKYFOR3D

I modelli di simulazione tridimensionale sono stati introdotti al fine di conoscere il fenomeno di crollo di massi per individuarne:

- 1) il pericolo e la sua distribuzione areale;
- 2) fattori di innesco e modellazione della runout;
- 3) magnitudo e tempi di ritorno;
- 4) realizzare interventi di sicurezza.

Le analisi delle interazioni massa-infrastrutture e parametri di sicurezza nel caso di località antropizzate, permettono di arrivare a conoscere la dinamica della manifestazione dannosa, ricostruirne lo sviluppo in post-evento ma, soprattutto, a comprenderne la pericolosità al fine di sopperire alla mancanza di tempi di preavviso sufficienti alla messa in sicurezza della popolazione interessata e alla realizzazione di efficaci contromisure di sicurezza (barriere paramassi, reti paramassi, muri contenitivi, deviatori, etc.)

Il Rockyfor3D (1998), discendente dei modelli Rocky3 e RockyFor, rappresenta uno dei migliori simulatori tridimensionali attualmente in commercio, destinati all'interpretazione stocastica dei fenomeni di crollo di roccia ed il loro fattore di dissipazione dell'energia su versanti privi di vegetazione o all'occorrenza contro le popolazioni forestali..

Ideato dal Dr. Luuk K.A. Dorren (Federal Office for the Environment, FOEN, Svizzera), con la collaborazione di diversi altri autori, sulla base di combinazioni di processi fisici e algoritmi deterministici, perfezionato sulle Alpi austriache e francesi da Frédéric Berger (Cemagref Grenoble, Francia) attraverso sperimentazioni in campo di rockfalls verificatesi con e senza copertura vegetale, il software è in grado di produrre una mappa raster delle traiettorie tridimensionali di caduta massi che con molta probabilità si andrebbero a verificare in caso di crollo reale.

Per il suo funzionamento Rockyfor3D si basa sull'analisi di modelli di elevazione digitale del terreno (DEM), completate da una serie di ulteriori raster atti a descrivere nel dettaglio la micro-topografia.

Al fine di dare la maggior verosimiglianza al fenomeno, RockyFor3D interpreta la traiettoria di caduta dei massi rocciosi come una sequenza di paraboliche in aria e rimbalzi lungo il versante, analizzandone gli impatti al suolo e/o con la foresta, quantificandone le energie in gioco.

Il suo impiego comporta l'esigenza di una robusta conoscenza delle caratteristiche territoriali e dei dati input necessarie al corretto avvio delle simulazioni degli eventi di rockfall, trasformando il sistema in un valido supporto alla gestione selvicolturale delle foreste di protezione [Stoffel et al., 2006].

Se usato opportunamente è in grado di produrre un ricco database sugli eventi di rockfalls impiegabile nella realizzazione di:

- studi del pericolo a scala regionale;
- mappe del pericolo;
- analisi in dettaglio del pericolo per singole pendenze.

2.2. ALGORITMI DI CALCOLO

Il sistema reinterpreta i dati in possesso al fine di ottenere una simulazione dell'evento di rockfall finalizzata all'analisi delle traiettorie intraprese dai blocchi in caduta lungo il pendio, le possibili deviazioni in seguito ad impatti al suolo post-rimbalzo e urti contro ostacoli di diversa origine (generalmente alberi) ed il conseguente calo della velocità per dissipazione dell'energia del masso.

L'elaborazione di questi tre aspetti costituisce il fondamento del software, secondo tre moduli principali e uno dedicato all'analisi dell'effetto di dissipazione dell'energia esercitato dalla foresta:

2.2.1. TRAIETTORIE DI CADUTA

Analizzando la distribuzione delle pendenze per ogni singola cella a partire dal modello di elevazione digitale (*DEM*) del sito di studio, *Rockyfor3D* interpreta le varie altezze di quota producendo simulazioni di traiettorie di rockfall assecondando la topografia dell'area e soppesando l'energia cinetica acquisita dal masso durante il percorso (figura 2).

Come già indicato precedentemente, la traiettoria è considerata come un susseguirsi di rimbalzi e parabole in aria; per quanto riguarda le rotazioni del blocco roccioso sulla superficie, la simulazione considera tale movimento come una successione di rimbalzi a breve/brevissima distanza (pari al raggio *R* del masso e non inferiori a 0,2 metri). Suddetta approssimazione risulta totalmente errata nel caso dello scorrimento, per questo motivo tralasciato dal modello [Dorren, 2012].

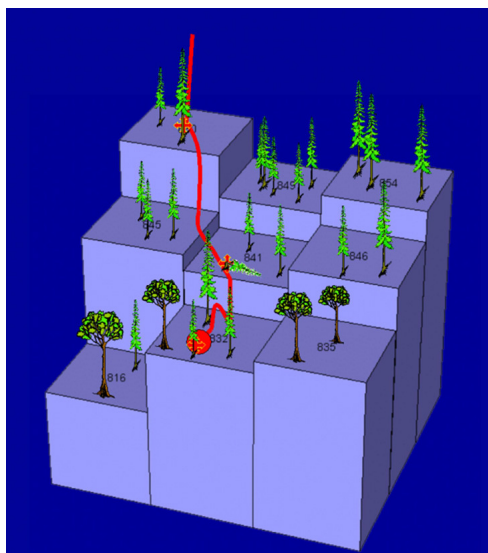


Figura 2: Interpretazione della traiettoria di caduta secondo Rockyfor3D su base DEM.

Il quantitativo di simulazioni per cella, o lanci, è aperto alla scelta dell'operatore. Ogni singola traiettoria ha origine con l'innesco del movimento del blocco di roccia, direttamente correlato alla forza di gravità che grava su di esso e, a tal proposito, è individuato per pendenze maggiori a 40°-50°; a prescindere dagli eventi atmosferici agenti sul sito, tale inclinazione è di norma superiore alla forza di attrito che permette al litoide di restare in sede.

Questi punti di innesco, o *aree sorgenti*, rivestono particolare importanza, in quanto la loro altezza rispetto al piano del suolo e la lontananza da possibili ostacoli (depressioni, popolamenti forestali, infrastrutture, blocchi di roccia), producono un sostanziale aumento dell'energia cinetica del masso. La corsa del masso lungo le traiettorie simulate dal software, comprensive di deviazioni ed eventuali variazioni del percorso post-rimbalzo, risente in particolar modo delle condizioni di acclività del terreno e della presenza di possibili ostacoli; termina con l'esaurimento dell'energia cinetica del blocco, conseguibile per cause naturali (riduzioni delle pendenze) o per dissipazione in seguito a collisioni.

Le variazioni di traiettoria post-rimbalzo si basano su:

- velocità del blocco in entrata e direzione;
- micro topografia dell'area (pendenza);
- range di possibili deviazioni del percorso originale (0°÷60°);
- probabilità di accadimento (determinata dalla velocità di pre-rimbalzo).

Quanto detto viene schematizzato in figura 3; successivamente al rimbalzo la traiettoria subisce una deviazione pari all'angolo maggiormente rappresentativo delle condizioni di acclività delle celle confinanti, in relazione alla velocità posseduta dal litoide; generalmente ciò si manifesta con il compimento di una traiettoria che privilegia la linea di massima pendenza [Zevenbergen e Thorne, 1987].

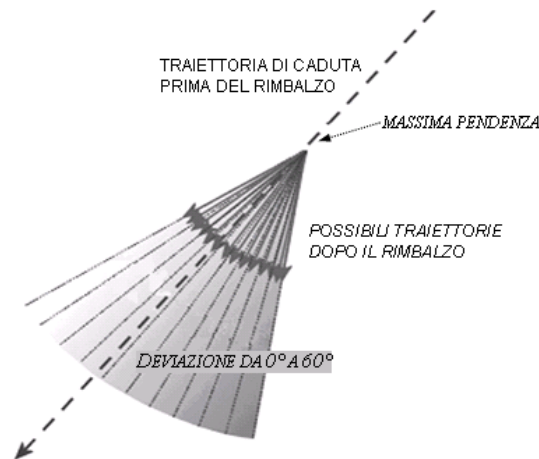


Figura 3: Interpretazione grafica del cambio nelle traiettorie di caduta in seguito al rimbalzo, secondo Rockyfor3D.

Tale comportamento presenta però una componente casuale, scelta sulla base di una range di angoli tra 0° e 60° , in grado di produrre ulteriori traiettorie, deviate rispetto all'originale in pre-rimbalzo in combinazione alla velocità. I dati, visibili in tabella 1, sono frutto di analisi statistiche sulle traiettorie conseguite durante le sperimentazioni da Dorren et al. (2006).

Angolo di deviazione ($^\circ$)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55
$V < 10$ m/s	49	15	9	6	5	4	3	3	3	2	2
$10 \leq V < 15$ m/s	53	14	8	6	4	4	3	3	2	2	2
$V \geq 15$	46	16	10	7	5	4	4	3	3	2	0

Tabella 1: deviazione delle traiettorie in relazione alle velocità di caduta dei blocchi di roccia rispetto alla linea di massima pendenza.

2.2.2. DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA

Sulla base delle elaborazioni prodotte con il primo modello, *Rockyfor3D* è in grado di quantificare la perdita di energia del masso considerando l'entità degli impatti in seguito ai rimbalzi al suolo, secondo il coefficiente di restituzione del terreno oppure per collisione contro ostacoli a terra.

Rockyfor3D analizza in primis la dispersione di energia del blocco di roccia che avviene naturalmente durante la discesa a valle: partendo da valori di default che assimilano i massi a

forme sferiche, il software localizza la posizione del litoide ad ogni istante e la sua situazione (n.1 di figura 4).

Avendo come base il modello digitale del terreno, è possibile ottenere l'andamento (traiettoria e velocità) del masso vincolato alla micro-topografia del versante; il software prevede movimenti identificabili con il moto parabolico uniformemente accelerato attraverso l'aria che implicano quindi un impatto al suolo (n.2 di figura 4). Tali collisioni, a seconda delle caratteristiche del terreno (coefficienti di restituzione) e al grado di penetrazione al suolo (D_p) del blocco di roccia, causano la perdita dell'energia cinetica del blocco e ne condizionano il successivo rimbalzo (n.4 di figura 4).

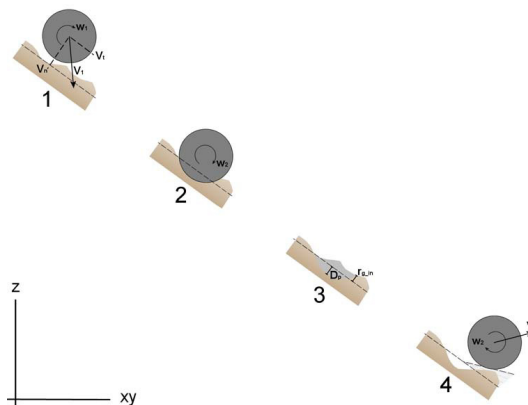


Figura 4: rappresentazione schematica della dinamica di caduta del masso lungo il versante, in considerazione dell'andamento parabolico della traiettoria con rotazione in aria (1), collisione al suolo (2) e conseguente grado di penetrazione D_p nel terreno post-impatto (3), con ripresa del moto di discesa a valle (4).

2.2.3. CALCOLO DELLA VELOCITÀ DI CADUTA

Fondando le simulazioni in relazione all'energia cinetica posseduta dal masso in ogni singola cella, la velocità con cui esso può spingersi a valle assume un ruolo chiave nella determinazione del movimento. Ciò che viene analizzato riguarda in particolar modo l'andamento delle velocità in seguito al manifestarsi di rimbalzi (coefficiente di restituzione tangenziale) ed eventuali deviazioni della traiettoria iniziale; a tale proposito particolare attenzione meritano i fattori che ne determinano le variazioni, come le caratteristiche morfometriche del blocco e le scabrezza della superficie del pendio (indice Mean Obstacle Height, MOH).

MOH – Mean Obstacle Height

L'indice dell'altezza media degli ostacoli presenti al suolo determina la microtopografia della superficie del pendio, ossia il suo grado di rugosità e, di conseguenza, la probabilità che un masso in caduta libera si abbatta contro una delle discontinuità presenti.

Misurato in campo, il MOH è rappresentativo dell'altezza media del materiale di origine rocciosa (esclusa quindi la lettiera e la componente organica del terreno) distribuito sull'orizzonte del versante e raggruppato in tre principali classi dimensionali, secondo la loro frequenza di ripartizione sul terreno:

- classe 10: altezza media del 10% degli ostacoli al suolo;
- classe 20: altezza media del 20% degli ostacoli al suolo;
- classe 70: altezza media del 70% degli ostacoli al suolo.

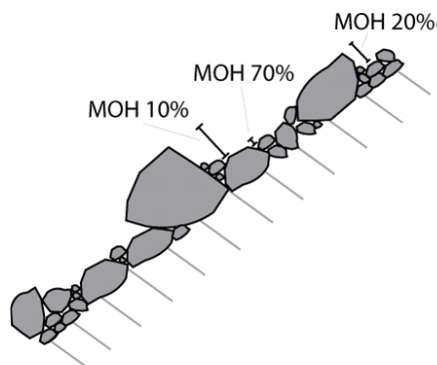


Figura 5: schematizzazione della struttura del terreno ai fini dell'interpretazione dell'indice MOH: definizione delle altezze degli ostacoli a seconda della loro frequenza del 70%, 20% e 10% di distribuzione sul versante.

Rispetto al DEM permette di approfondire con maggior dettaglio la morfologia locale del versante, al fine di dare effettivo valore alle simulazioni delle traiettorie impegnate dai massi in caduta, nonché peso alle dissipazioni energetiche dovute agli urti.

Il MOH, con il suo intervallo di valori da 0 a 100, entra di fatto nell'espressione del coefficiente di restituzione tangenziale R_t , ossia il valore rappresentativo del decremento di velocità subito dal masso in seguito ad un rimbalzo e conseguente impatto al suolo [Pfeiffer and Bowen, 1989; Spang and Krauter, 2001; Dorren et al., 2004]:

$$R_t = \frac{1}{1 + [(MOH + D_p) / R]} \quad [11]$$

Per la determinazione del coefficiente R_t il valore della scabrezza del versante viene scelto all'interno delle tre classi prestabilite e soppesato alla massima profondità di penetrazione (D_p) creata dal masso nell'impattare al suolo [Pichler et al., 2005], secondo la dimensione del suo raggio (R).

Al fine di rappresentare al meglio le naturali discontinuità del terreno, il coefficiente R_t viene impiegato nelle formule con variazioni di $\pm 10\%$, scelte casualmente dal modello.

A sua volta il coefficiente di restituzione tangenziale, in seguito alla collisione contro il terreno, influisce sulla velocità del masso, secondo l'equazione degli Autori Pfeiffer e Bowen (1989):

$$V_{t2} = \sqrt{\frac{R^2 \cdot (I \cdot V_{rot1}^2 + RockMass \cdot V_{t1}^2) \cdot R_t}{I + RockMass \cdot R^2}} \quad [12]$$

Rispetto alla velocità tangenziale V_{t1} posseduta dal blocco di roccia prima dell'urto, V_{t2} rappresenta la cinetica del masso post-impatto in funzione del peso del blocco in chilogrammi (RockMass) e del momento di inerzia I correlato alla forma dello stesso, generato dalla velocità di rotazione V_{rot1} antecedente al rimbalzo.

Successivamente all'impatto la traiettoria di caduta del masso perderà la componente tangenziale per riassumere andamento normale, con un nuovo valore di velocità (V_{n2}) [Pfeiffer and Bowen, 1989]:

$$V_{n2} = V_{n1} \cdot \frac{R_n}{1 + \left[\frac{abs \cdot V_{n1}}{9} \right]^2} \quad [13]$$

Dove: V_{n1} : velocità normale prima del rimbalzo; R_n : coefficiente di restituzione normale (definito sulla base delle caratteristiche del tipo di suolo dal file soiltype.asc); abs: fattore di variazione di R_n correlato all'elasticità del rimbalzo a seconda della velocità di collisione (elastico a basse velocità, anelastico ad alte velocità) [Habib, 1977].

Nel caso in cui l'angolo di inclinazione originatosi al momento dell'impatto si riduca notevolmente (per pendenze di versante pari a 4°), il movimento di caduta libera a valle assumerà andamento parabolico ridotto in corte distanze, approssimabile quindi al moto di rotazione del masso.

Tale manifestazione viene determinata secondo la formula di Pfeiffer e Bowen (1989) per quanto concerne la velocità di rotazione del blocco successivamente all'urto V_{rot2} :

$$V_{rot2} = \min \left[\frac{V_{t2}}{R}; V_{rot1} + \frac{(V_{t1} - V_{t2}) \cdot 2}{5 \cdot R} \right] \quad [14]$$

2.2.4. IMPATTO CON LA FORESTA

Dal momento che il programma è destinato allo studio degli effetti di un crollo su popolamenti forestali, il calo di energia cinetica legato alla dissipazione in seguito agli impatti tra rocce ed alberi assume un ruolo chiave nelle simulazioni; suddetta capacità di assorbire e ammortizzare l'energia del blocco è equiparabile alle caratteristiche delle opere ingegneristiche di protezione.

Nelle traiettorie simulate da Rockyfor3D la posizione del blocco è sempre nota: ciò permette al programma di elaborare l'effetto dell'impatto roccia-vegetazione forestale, analizzandone:

- energia cinetica del blocco;
- luogo dell'impatto (coordinate xy);
- posizione della collisione sul tronco;
- DBH della pianta;
- tipologia della pianta (conifera o latifolia).

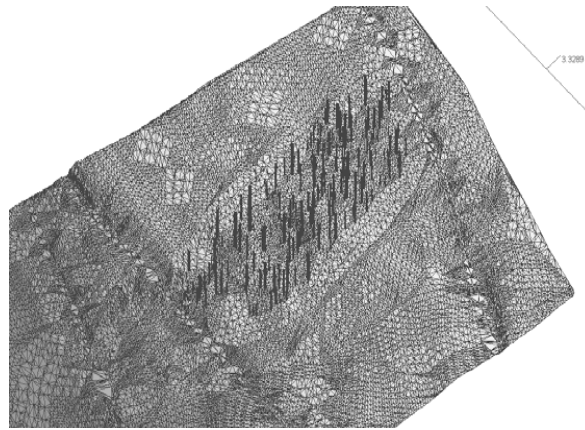


Figura 6: elaborazione digitale di un modello di andamento del terreno e della sua copertura forestale; [LeHir, 2004]

Attualmente il software quantifica la dispersione di energia totale E_{dtree} secondo l'equazione [15], che valuta il potenziale (in kJ) della pianta considerando DBH, posizione dell'urto e angolo di impatto:

$$E_{dtree} = \frac{E_{dissM} \cdot E_{dissV} \cdot E_{dissH} \cdot E_{diss\alpha_imp}}{1000} \quad [15]$$

1) E_{dissM} – Massima energia dissipabile.

A prescindere dalle caratteristiche del blocco giunto fino al tronco al momento dell'impatto, la quantità massima di energia che una pianta è in grado di dissipare è correlata al suo diametro, preso a 1,30 metri da terra e al suo coefficiente di resistenza dalla rottura FE_{ratio} , determinato dalla specie di appartenenza (0,93 per le conifere e 1,59 per le latifoglie).

$$E_{disM} = FE_{ratio} \cdot 38,7 \cdot DBH^{2,31} \quad [16]$$

2) E_{dissH} – Massima energia dissipabile (componente orizzontale).

Ottenuta a partire da studi basati sull'analisi dei parametri legati alle caratteristiche morfo-dendrologiche di *Abies alba*, la specie utilizzata nelle sperimentazioni dall'Autore [Dorren et Berger, 2006], rappresenta l'energia potenzialmente dissipabile dalla pianta analizzandone la componente angolare dell'urto, ossia la posizione dell'impatto sulla circonferenza dell'albero rispetto al suo asse centrale verticale (Pi-CTA).

$$\Delta E(\%) = E_{dissH} = -0,048 + \frac{0,98 + 0,046}{1 + 10^{[0,58 - ((Pi-CTA)/0,5 \cdot DBH) - 8,007]}} \quad [17]$$

3) E_{dissV} – Massima energia dissipabile (componente verticale).

ΔE è realmente dissipabile solo se la collisione avviene entro una determinata altezza sul tronco della pianta rispetto al suo colletto; maggiore sarà l'altezza da terra dell'impatto del masso sul fusto dell'albero minore risulterà l'effetto di ritenuta, con notevole aumento della tendenza della pianta alla rottura del legno ed eventuale stroncamento. Rockyfor3D rapporta l'altezza utile alla dimensione del DBH della pianta, secondo l'equazione:

$$H_{tree} = 1,22 \cdot DBH^{0,8} \quad [18]$$

Recenti analisi pubblicate da Dorren e Berger (2006), Jonsson et al. (2007) e Lundström et al. (2009) hanno permesso di identificare il valore della massima energia dissipabile verticalmente sulla base dell'altezza Z_i (in metri) di impatto del masso sul tronco rispetto ad H_{tree} della pianta.

$$E_{dissV} = 1,62 \cdot \left(\frac{1}{1 + e^{18,04 \cdot (Z_i / H_{tree}) + 0,02 \cdot DBH - 2,35}} - \frac{1}{1 + e^{15,69 + 0,02 \cdot DBH}} \right) \quad [19]$$

4) $E_{diss\alpha_{imp}}$ – Angolo di impatto della dissipazione energetica.

Nel capitolo 1.4.1.A è stato illustrato come angoli di incidenza diversi possano influire più o meno efficientemente sulla dissipazione di energia operata da un ostacolo posto in verticale.

Per quantificare la massima energia dissipabile secondo l'angolo in cui avviene l'urto α_{imp} (°), Jonsson (2007) propone l'equazione:

$$E_{diss\alpha_{imp}} = \min(1, (1,03 \cdot \sin(1,46 \cdot \frac{\min(\alpha_{imp}, 70)}{180^\circ} \cdot \pi + 0,73))) \quad [20]$$

2.3. RASTER DI INPUT E DI OUTPUT DELLA SIMULAZIONE CON ROCKYFOR3D

La complessità delle simulazioni di Rockyfor3d deriva dall'inserimento di un ricco database di input atto a fornire al software un quadro dettagliato della situazione dell'area presa in esame.

Buone conoscenze del territorio risultano perciò indispensabili alla predisposizione dei files di input, costituiti da un numero minimo di dieci mappe raster in formato ASCII, di eguale risoluzione (ottimale da 2 a 10 metri per cella) [Dorren e Heuvelink, 2004], destinati alla descrizione degli elementi caratteristici del versante e rielaborati in seguito per ottenere l'evento di rockfall.

Parte dei dati di input sono riservati alla rappresentazione della geomorfologia del sito, mentre la restante componente è indirizzata all'identificazione delle caratteristiche vegetazionali, nel caso in cui si voglia quantificare l'effetto della foresta contro il fenomeno di crollo.

È possibile inoltre predisporre un file contenente informazioni relative a piccole opere di difesa, quali le barriere paramassi, per quantificarne la funzionalità.

2.3.1. FILES DI INPUT

1. dem.asc *Modello digitale del terreno.* Impiegato per l'analisi della pendenza e dell'esposizione. In alternativa è possibile servirsi anche del DTM.
2. soiltype.asc *Tipologia del suolo.* Mappa raster identificativa del tipo di sottosuolo del versante. Ha lo scopo di fornire informazioni sull'elasticità del terreno (R_n) riscontrabile durante l'impatto al suolo delle rocce. Rockyfor3D prevede 8 modelli di sottosuolo:
 - 0 – materiale molle interamente penetrabile;
 - 1 – sedimento fine (penetrazione oltre i 100 centimetri);
 - 2 – sedimento fine/sabbioso (penetrazione inferiore ai 100 centimetri);
 - 3 – terreno compatto di medie dimensioni, ghiaione ($D \leq 10$ cm), strada forestale;
 - 4 – terreno compatto e frazione detritica, ghiaione ($D > 10$ cm);
 - 5 – suolo roccioso alterato, terreno coesivo interamente ricoperto da detrito;
 - 6 – suolo roccioso compatto;
 - 7 – strada asfaltata.

Coefficiente medio di restituzione normale

$R_N = 0$ per *solitype 0*

$R_N = 0,23$ per *solitype 1*

$R_N = 0,28$ per *solitype 2*

$R_N = 0,33$ per *solitype 3*

- $R_N = 0,38$ per *solitype 4*
 $R_N = 0,43$ per *solitype 5*
 $R_N = 0,53$ per *solitype 6*
 $R_N = 0,40$ per *solitype 7*
3. rg70.asc
rg20.asc
rg10.asc *Mean Obstacle Heiglth.* Relativo alle percentuali di 70, 20 e 10. (Si veda il paragrafo 1.4.1.3).
 4. rockdensity.asc *Densità di roccia.* Mappa raster rappresentativa della distribuzione della componente rocciosa per cella, con valori da 0 (nessuna roccia) fino a 3300 kg/m³. Necessaria all'individuazione delle aree sorgenti o punti di rilascio dei blocchi (valori > 0) e alla calibrazione dei massi liberati.
 5. d1.asc
d2.asc
d3.asc *Dimensione dei blocchi.* Raccolta di altezze (D1), larghezze (D2) e lunghezze (D3) dei massi rilevati sulle singole celle sorgenti. Nelle simulazioni tali valori assumono casualmente variazioni volumetriche scelte tra $\pm 0\%$ e $\pm 50\%$.
 6. blshape.asc *Block shape_Forma del blocco.* Mappa raster comprensiva della definizione della forma apparente del masso per ogni cella sorgente. Rockyfor3D prevede 5 soluzioni:
0 – nessuna forma/dato mancante;
1 – blocco rettangolare ($D_1 \neq D_2 \neq D_3$);
2 – blocco ellissoidale ($D_1 \neq D_2 \neq D_3$);
3 – blocco sferico ($D_1 = D_2 = D_3$);
4 – blocco discoidale (con $D_{\min} = 1/3$ di D_x, D_y e $D_x \cong D_y$).
La cella sorgente con valore 0 viene gestita come blocco ellissoidale o sferico, sulla base dei raster d1-d2-d3.asc.

Per le simulazioni con popolamento forestale

7. treefile.txt *Aree forestali.* Mappa raster comprensiva del censimento forestale, derivata da rilievo in campo o da analisi satellitare Laserscanning (Metodo 1), ricostituita automaticamente dal software in assenza di dati puntuali (Metodo 2).

- Metodo 1:
Contiene le coordinate x e y di ogni albero e il relativo DBH.
- Metodo 2:
Posizione e dettaglio delle piante vengono randomizzati sulla mappa raster secondo i files prodotti:
 - nrtrees.asc: *densità forestale (N/ha)*;
 - dbhmean.asc: *DBH medio*;
 - dbhstd.asc: *deviazione standard del DBH*;
8. conif_percentuale.asc *Percentuale di conifere.* Valore % della quantità di conifere in grado di accrescere o abbassare la resistenza media del popolamento forestale sul crollo.

Per le simulazioni con opere di difesa

Operazione possibile mediante la conversione raster dei valori vettoriali delle linee rappresentanti le reti. Anche in questo caso è fondamentale lavorare con mappe della stessa risoluzione.

- | | | |
|-----|----------------|--|
| 9. | net_number.asc | Numero di reti paramassi. |
| 10. | net_energy.asc | Capacità di assorbimento dell'energia.(kJ) |
| 11. | net_height.asc | Altezza delle reti paramassi. |

2.3.2. IMPOSTAZIONI DELLA SIMULAZIONE

La generazione di simulazioni con Rockyfor3D è un aspetto speditivo del lavoro grazie ad un'interfaccia grafica minimalista e di istintiva comprensione.

All'operatore viene richiesto di individuare:

- *numero di simulazioni*: numero di traiettorie individuate per ogni cella sorgente.
- *variazione del volume del blocco*: percentuale (tra $\pm 0\%$ e $\pm 50\%$) con la quale le tre dimensioni del blocco verranno modificate in modo casuale durante ogni lancio.
- *altezza iniziale*: valore di default pari a 0 in quanto si tratta di una voce da inserire nel caso in cui il blocco roccioso venga rilasciato ad una certa distanza dal suolo; in questo modo il masso presenterà una velocità iniziale superiore.
- *foresta*: da considerare nel caso in cui si voglia considerare nella simulazione l'effetto di un popolamento.

2.3.3. FILES DI OUTPUT

Attraverso i files di input e le indicazioni fornite dall'operatore, Rockyfor3D ricrea l'evento di rockfall e ne simula lo sviluppo lungo il rilievo, registrando tutti i massimi valori risultati per ogni singola cella; le registrazioni vengono poi raccolte in mappe raster di eguale risoluzione.

Le voci prodotte sono composte da:

- | | | | |
|----|---|----|---|
| 1. | E_mean.asc: | kJ | Media dei valori massimi di energia cinetica di tutti i blocchi passati attraverso la cella. |
| 2. | E_50.asc/E_90.asc/
E_95.asc/E_98.asc/
E_99.asc/ | kJ | Valore dei percentili (mediana, 90esimo, 95esimo, 98esimo, 99esimo) delle energie cinetiche per ogni cella, suddivisi in classi di energia nelle mappe raster risultanti. |
| 3. | E_95CI.asc | kJ | Valore del 95% di tutti i valori massimi di energia cinetica del livello di confidenza, registrati in ciascuna |

			cella. Calcolato a partire da E_{mean} e deviazione standard, risulta rappresentare più concretamente i valori di energia massima assoluta dei blocchi in movimento.
4.	Ph_mean.asc	m	Valore medio delle altezze massime di passaggio raggiunte dai massi.
5.	Ph_50.asc/Ph_90.asc/ Ph_95.asc/ Ph_98.asc/ Ph_99.asc/	m	Valore dei percentili (mediana, 90esimo, 95esimo, 98esimo, 99esimo) delle altezze di passaggio per ogni cella, suddivisi in classi di altezza nelle mappe raster risultanti.
6.	Ph_95CI.asc	m	Valore del 95% di tutti i valori massimi di energia cinetica del livello di confidenza, registrati in ciascuna cella. Calcolato a partire da Ph_{mean} e deviazione standard, risulta rappresentare più concretamente i valori di altezza massima assoluta di passaggio dei blocchi in movimento.
7.	Nr_passages.asc	-	Numero di passaggi dei massi su singola cella.
8.	Nr_surcecells.asc	-	Numero di celle sorgenti coinvolte nel passaggio di massi in una data cella.
9.	Reach_probability.asc	%	Probabilità che una data cella venga coinvolta nel passaggio di una roccia. Valore calcolato come: $REACH\ PROBABILITY = \frac{Nr_passages \cdot 100}{Nr_surcecells \cdot Nr_simulazioni}$
10.	Nr_deposited.asc	-	Numero dei massi arrestati su di una determinata cella.
11.	Rvol_deposit.asc	m ³	Volume del masso più grosso depositatosi.
12.	EL_angles.asc	°	Angolo minimo della linea dell'energia prodotta dal blocco a partire dal suo distacco al punto di arresto.
13.	Traj_time.asc	s	Tempo minimo impiegato da un masso per raggiungere la cella di arresto a partire dalla cella sorgente.
14.	V_max.asc	m/s	Velocità massima raggiunta dal masso in caduta libera.
<i>Simulazioni con foresta</i>			
15.	Nr_tree_impacts.asc	-	Numero di impatti masso-pianta rilevati per singola cella.
16.	Tree_impact_heights.asc	m	Altezza massima di impatto raggiunta sulla pianta dal masso.

2.4. *LIMITAZIONI DEL MODELLO*

Le simulazioni ottenute con Rockyfor3D sono sensibili per quanto riguarda:

- **Risoluzione:** le risoluzioni raster consigliate si trovano all'interno dell'intervallo 2x2 fino a 10x10; un ulteriore approfondimento in dettaglio comporta sì una maggior precisione, tuttavia non sempre produce un miglioramento nella qualità del risultato finale. Risoluzioni ridotte spesso vanno a discapito dell'accuratezza della simulazione, infatti Rockyfor3D è stato realizzato per non subire l'azione di eventuali difetti nei raster (pit).

Il modello digitale del terreno deve provenire da database completi e ricchi in dettaglio sulla piccola scala, in quanto l'origine da fonti inadeguate, come ad esempio le carte tecniche ipsometriche, mancanti per quanto concerne la micro-topografia del suolo causerebbero scarsa attendibilità delle simulazioni.

- **Micro-topografia:** essenziale per il corretto funzionamento del software è la presenza di dem o dtm caratterizzati da una buona descrizione del territorio, in quanto è proprio la morfologia del suolo con le sue irregolarità a determinare le caratteristiche di caduta del masso e gli impatti verificatisi.
- **Altezza dei rimbalzi:** varia al decrescere della risoluzione del DEM; tende ad abbassarsi nelle superfici pianeggianti e, al contrario, aumenta nei versanti più acclivi [Agliardi e Crosta, 2003].
- **Distribuzione degli impatti:** la localizzazione spaziale dei massi nelle simulazioni è prossima al dato reale [Stoffel et al., 2006] ma perde di accuratezza in presenza di raster a bassa risoluzione.
- **Altezza degli impatti:** la posizione media degli impatti lungo il fusto delle piante ha scarsa corrispondenza alla realtà, soprattutto se prodotta a partire simulazioni basate su DTM di limitata qualità.

3.1. EFFETTO DI PROTEZIONE DELLA FORESTA CONTRO GLI EVENTI DI ROCKFALLS

Nel corso del suo sviluppo, l'umanità ha sempre avuto uno stretto legame con le foreste; da rifugio, a fonte di cibo e materiale da costruzione fino alla più recente funzione protettiva contro il rischio di dissesti idrogeologici.

Da un più antico ruolo passivo di difesa contro erosione dei pendii, danni meteorologici, frane e smottamenti, inneschi di valanghe, regimazione delle acque e abbattimento degli inquinanti, si è passati ad un concetto di protezione attiva, ossia mirato e puntuale nel tempo, appreso all'incirca negli anni '80 e soppesato dalla necessità di ricercare sistemi di ritenuta economici, efficienti, capaci di superare le limitazioni dettate dalle odierne infrastrutture di sicurezza, aspirando al rispetto dell'ambiente.

Negli ultimi decenni mezzi e tecnologia hanno reso possibile l'approfondimento degli studi sul reale effetto di protezione ottenibile da foreste ben assestate contro eventi di rockfalls [Couvreur, 1982; Jahn, 1988]; conoscendone nel dettaglio tale potere, quantificandolo esattamente sulla base di una reale funzione di protezione, alcuni Autori tra cui Meloni (2006) hanno proposto di suddividere in tre stadi l'effetto protettivo delle foreste:

- **primo livello di protezione** (generico): funzione di tutela svolta da ogni foresta, indipendentemente dalla localizzazione e dalla composizione. Generalmente escluse dagli interventi selvicolturali a scopo produttivo, garantiscono le basilari necessità di regimazione delle acque di superficie, tutela contro il rischio idrogeologico e qualità dell'aria, etc.;
- **secondo livello di protezione**: foreste in grado di operare attivamente azioni di mitigazione di un disturbo, presso un'area con versanti caratterizzati da pendenze superiori ai 30°, predisposte pertanto a caduta massi, valanghe e cedimenti superficiali;
- **terzo livello di protezione (foreste di protezione diretta – FPD)**: sono foreste di secondo livello con azione difensiva diretta, in quanto poste a monte di un elemento da proteggere (uno specifico manufatto antropico) [AA.VV., 2006; Brang, 2001; Dorren et al., 2004; Motta e Haudemand, 1999].

3.2. PROCESSO DI DISSIPAZIONE DELL'ENERGIA CINETICA IN BOSCO.

Per quanto concerne gli eventi di rockfalls, sono da intendersi con il termine di “effetto della foresta”, non solo piante in piedi bensì arbusti, piano erbaceo, detrito legnoso e tronchi a terra; questo pattern forestale è così in grado di operare un sostanziale effetto barriera contro il disturbo: successivamente ad una serie di impatti contro la vegetazione, la dissipazione dell'energia cinetica dei massi movimentati è inevitabile.

3.2.1. FUNZIONE DIRETTA DEL COMPLESSO FORESTALE

Tale fenomeno di dispersione dipende ovviamente dalle dimensioni del litoide in corsa, dall'energia cinetica che possiede in relazione alla lunghezza del pendio attraversato, nonché dalle caratteristiche del bosco (densità, distribuzione delle piante, specie) [Berger e Dorren, 2006].

Si stima che una foresta di conifere di età matura sia in grado di assorbire e dissipare fino a 200-500 kJ di energia [Dorren et al., 2007] e, rispetto ad un versante privo di vegetazione, la copertura forestale può comportare una riduzione del pericolo da rockfall pari al 63%, grazie ad una diminuzione delle velocità del moto dei massi stimata al 26% e un'attenuazione del 33% dell'altezza di rimbalzo [Dorren et al., 2005].

Sebbene sia uso comune definire come potenziale limite dell'effetto della foresta la capacità di arrestare massi non superiori ai 5 metri cubi di volume, lungo le Alpi sono numerosi i casi di blocchi arrestati di dimensioni pari a 10 metri cubi [Dorren et al., 2005].

L'effetto di dissipazione dell'energia cinetica prodotto dalla foresta [Rammer, 2010] avviene per:

- 1) *forze di attrito*: effetto indirettamente correlato alla presenza di alberi, in considerazione del limite potenziale di un bosco; ove vi sia una copertura forestale stabile, i versanti assumono inclinazioni minori: di conseguenza, maggiori forze di attrito si oppongono al movimento dei massi, causandone riduzioni della corsa, favorendo il rotolamento del blocco lungo il versante;
- 2) *impatto e contatto* contro ostacoli: lungo il percorso il masso urterà vegetazione in piedi ed ostacoli a terra, come legname morto, altro detrito e scabrosità del suolo; a seconda della severità dell'impatto e dell'inclinazione del versante il blocco di roccia risponderà con un rimbalzo o avanzerà rotolando in un'altra direzione;

- 3) *smorzamento del rimbalzo*: impattando al suolo, l'energia del rimbalzo scemerà in seguito all'ammortizzamento fornito dalla componente humica del terreno e alle sue deformazioni plastiche (si veda capitolo 1.3.1);
- 4) *arresto*: in presenza di bassi livelli di energia, urti contro la vegetazione o grossi ostacoli decentrati di angoli inferiori ai 25° rispetto all'asse verticale dell'elemento colpito, sono in grado di procurare una deviazione tale del moto della roccia fino a causarne l'arresto della corsa per azzeramento dell'energia cinetica disponibile.

3.2.2. FUNZIONE DIRETTA DELLA SINGOLA PIANTA

Gran parte dell'effetto di protezione offerto da una foresta è riconducibile alla componente arborea. Questa, essendo di ostacolo alla discesa a valle della rockfall, comporta un cambio dell'energia cinetica dei blocchi, attraverso una serie di interazioni suolo-albero-roccia

Nello specifico, l'albero è in grado di assorbire la forza del masso (fino all'80% dell'energia cinetica) che viene a scaricarsi sull'intera struttura della pianta; il fusto è il primo elemento a risentire del forte impatto, con oscillazioni che possono procurare la rottura del cimale (soprattutto nel caso delle conifere); successivamente, se il tronco non si spezza, l'onda d'urto passa al sistema apparato radicale-suolo, dove il grado di ancoraggio della radice determina la resistenza finale della pianta e la dissipazione dell'energia attraverso [Foetzki et al., 2004; Brauner et al., 2005]:

- rotazione e traslazione del sistema apparato radicale-suolo;
- deformazioni ed oscillazioni del fusto;
- locali penetrazioni della roccia nel legno.

Ruolo positivo anche per la chioma dell'albero che, a differenza di quanto accade in caso di forte vento e violente precipitazioni, è in grado di smorzare le oscillazioni del fusto causate dall'urto.

Nel momento in cui l'energia cinetica del masso è superiore alla capacità dissipativa dell'albero, esso cederà di fronte alla forza peso del litoide, rispondendo con rottura parziale del fusto, totale a livello del colletto o sradicamento e schianto dell'intera pianta [Brauner et al., 2005, Dorren et al., 2005; Dorren e Berger, 2006; Zinggerle, 1989].

Ciò dipende sostanzialmente:

- 1) **dal tipo di pianta oggetto di urto:** conifera o latifoglia; diversi studi hanno dimostrato una maggior predisposizione alla rottura degli apici per le conifere e superiore resistenza agli impatti per le latifoglie [Dorren e Berger, 2006]; apparato radicale profondo o fascicolato, per una garanzia di stabilità della pianta; direzione di crescita della pianta rispetto alla corsia di rilascio del detrito; presenza di nodi, legno di reazione ed altri elementi di indebolimento meccanico della pianta;
- 2) **dall'area basale della pianta,** in quanto è proprio il tronco ad opporre la maggiore resistenza all'impatto, in relazione alla dimensione del blocco caduto; secondo Schwitter (1998), tale rapporto risulta positivo per l'azione di protezione svolta dalla foresta quando il diametro basale dell'albero non è inferiore a 1/3 del diametro massimo della roccia (in circostanze standard). Dorren e Berger hanno prodotto l'equazione [20] al fine di valutare tale capacità di dissipazione dell'impatto:

$$E_{disM} = FE_{ratio} \cdot 38,7 \cdot DBH^{2,31} \quad [20]$$

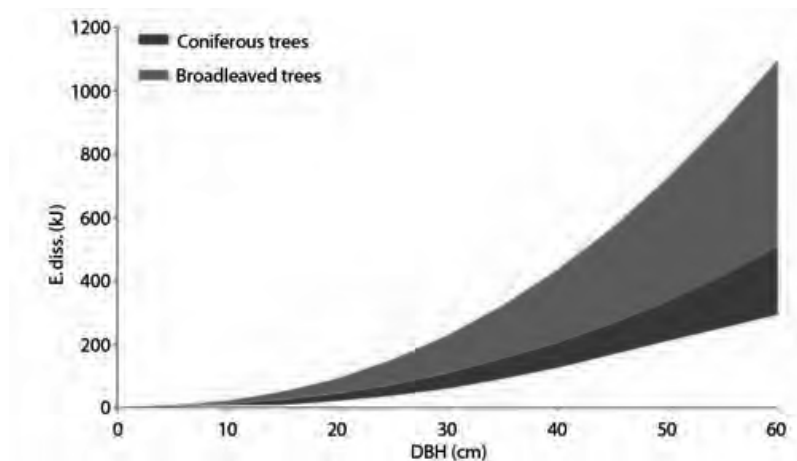


Figura 7: curva del potenziale energetico massimo dissipabile (kJ) da conifere e latifoglie in rapporto al valore di DBH (cm).

dove: E_{dissM} : [kJ]; FE_{ratio} : energia di frattura del tronco (Dorren e Berger propongono valori di 0,93 per le conifere e 1,59 per le latifoglie).

Considerando che l'energia cinetica dissipabile da una pianta (E_{dis}) deve essere superiore all'energia cinetica del masso, è possibile ricavare dall'equazione [20] il valore minimo della circonferenza del fusto, necessario affinché esso non si spezzi sotto la forza peso del blocco in caduta. Tale valore è noto come *diametro minimo efficace* e generalmente non viene studiato per impatti con massi di volumetrie maggiori ai 5 metri cubi (tabella 2).

Volume dei blocchi (m ³)	Diametro approssimativo del blocco (m)	Diametri minimi efficaci degli alberi
Fino a 0,05	Fino a 40	Da 12,5 a 20
Da 0,05 a 0,2	Tra 40 e 60	Da 20 a 35
Da 0,2 a 5	Oltre 60	Oltre 35

Tabella 2: parametri standard di protezione delle foreste.

3) dalla localizzazione dell'impatto sul tronco (P_I -CTA, *Central Tree Axis*): comportamento molto simile alla dinamica delle interazioni post-impatto tra roccia e suolo trattate nel capitolo 1.3.1; a seconda di come avviene l'urto, la dissipazione dell'energia cinetica operata dal tronco sarà più o meno elevata. Nel corso degli studi, il tronco delle piante è stato associato alla figura di un cilindro regolare e ripartito simmetricamente in tre aree sulla base dell'effetto prodotto in seguito all'impatto con le rocce (figura 8 e 9).

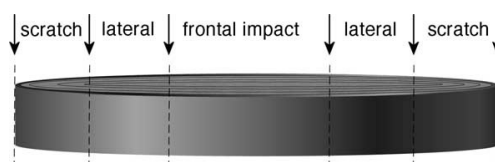


Figura 8: suddivisione della circonferenza del tronco in relazione alle possibilità di impatto.

- **Impatto frontale:** collisioni di questo genere sono in grado di produrre le maggiori dissipazioni di energia cinetica dei blocchi; è la tipologia di scontro generalmente più frequente, però non è in grado di arrestare la corsa dei massi, che proseguono mantenendo la traiettoria.

- **Impatto laterale:** rispetto agli impatti frontali hanno minore potere dissipativo, specialmente nelle zone più prossime al bordo della circonferenza (scratch), tuttavia ricoprono un ruolo ottimale nell'arresto dei blocchi in discesa; il particolare angolo che viene a formarsi durante la collisione tronco-masso determina una brusca deviazione della traiettoria originaria del blocco. In seguito ad impatto laterale il masso prosegue la corsa in direzione obliqua rispetto al percorso pre-collisione.

- **Scalfitture (scratch):** contatto tronco-masso molto limitato, di alcun effetto per quanto concerne la riduzione dell'energia cinetica e la traiettoria del blocco [Dorren e Berger, 2006]

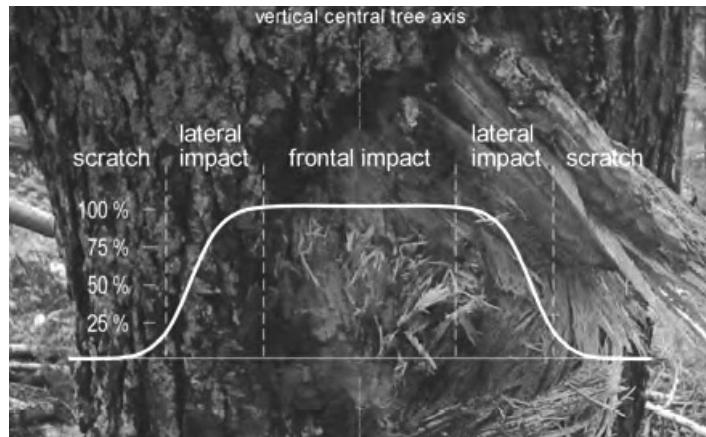


Figura 9: livello di energia cinetica del masso (%) dissipabile dalla pianta in relazione al punto di collisione sulla circonferenza del tronco.

LOCALIZZAZIONE DELL'IMPATTO	PROBABILITÀ (%)		
	Deviazione 0 – 22,5°	Deviazione 22,5° - 67,5°	Deviazione 67,5° – 76°
Frontale	44%	50%	6%
Laterale	11%	84%	5%
Scratch	72%	24%	4%

Tabella 3: analisi statistica della risposta all'impatto contro la pianta: dissipazione dell'energia cinetica come probabilità (%) di deviazione della traiettoria di caduta del masso.

Quanto detto trova riscontro in seguito alle sperimentazioni su piante di abete bianco ad opera di Dorren e Berger (2006), che in seguito a diverse prove in campo hanno dimostrato la relazione [21] per il calcolo dell'energia massima dissipata ΔE di un albero, secondo la localizzazione dell'impatto:

$$\Delta E(\%) = E_{dissH} = -0,048 + \frac{0,98 + 0,046}{1 + 10^{[0,58 - ((Pi - CTA) / 0,5DBH) - 8,007]}} \quad [21]$$

- 4) **dalle dimensioni e forma del masso:** l'efficacia di una foresta di protezione è legata anche alla forma e dimensione dei massi in caduta; per blocchi di forma circolare, capaci di acquisire maggiori velocità di movimento, l'effetto barriera offerto dagli alberi è limitato mentre blocchi dal volume irregolare hanno superficie maggiormente soggetta allo scontro a causa di protuberanze e spigoli, con la risultante di una dissipazione energetica superiore.

Le dimensioni devono invece essere relazionate all'area basimetrica del tronco, nel rapporto di 1 a 3 tra DBH della pianta e diametro della roccia [Schwitter, 1998; Dorren e Berger, 2006]; non meno importante è la grandezza dei massi in rapporto alla densità della copertura forestale: nel caso di detrito di minor calibro, una foresta molto densa

con alberi di piccolo diametro sarà comunque in grado di attivare un ottimale sbarramento contro l'avanzata del rockfall, cosa che non avverrà nel caso in cui vi siano grandi esemplari in coperture forestali più leggere.

- 5) **dalla frequenza di successione di impatti:** l'effetto del singolo impatto tronco-masso difficilmente è tale da dissipare completamente l'energia cinetica del blocco in movimento, perciò riveste molta più importanza la successione di collisioni che avvengono in una determinata foresta.

All'aumentare degli urti, superiore sarà il potere protettivo del bosco, legato quindi alla distribuzione della componente arborea.

Al fine di studiare la reale efficacia degli urti in presenza di copertura vegetale è stato elaborato un rapporto che sancisce la combinazione numerica di impatti possibili in foresta, sulla base delle distanze percorribili tra due scontri e le caratteristiche del bosco.

La *Mean Tree Free Distance* (MTFD) [Gsteiger, 1993] calcola infatti la probabile distanza (lineare) media percorribile da un masso, lungo un pendio, tra due impatti con due differenti piante; per essere utile alla dissipazione dell'energia cinetica del masso la MTFD non deve superare i 40 metri, valore entro il quale il blocco di roccia non è potenzialmente in grado di acquistare la sua massima velocità di caduta, anche in assenza di ostacoli.

$$MTFD_G = \frac{Area}{(Nr\ stems \cdot R_{diam}) + \sum DBH} \quad [22]$$

Gsteiger orienta il calcolo della MTFD sulla relazione esistente tra l'estensione della foresta presa in esame (Area) [m²] e la sua componente totale di area basimetrica ($\sum DBH$) [m], rivolgendo l'attenzione al prodotto del numero di piante presenti nel sito analizzato (Nr stems) e il raggio del masso (R_{diam}) [m], valutandoli per una foresta a densità di copertura regolare.

Al contrario della [22], dove la MTFD è una stima che include tutti i diametri a petto d'uomo delle piante, Perret et al. (2004) introducono una modifica di tale valore, ottenendo così un'equazione più realistica della distanza media tra impatti, inserendo al posto della somma di DBH il valore del diametro medio ricavato in bosco (DBH_{medio}):

$$MTFD_P = \frac{Area}{Nr\ stems (R_{diam} + DBH_{medio})} \quad [23]$$

3.3. DANNI E LESIONI

Ad ogni collisione tronco-masso è inevitabile il danneggiamento nella pianta in maniera più o meno severa. Nel momento in cui la pianta possiede $E_{dis} < E_{cin}$ del masso, il legno del tronco subisce una torsione tale che ne lacera i tessuti, fino alla completa rottura del fusto. In mancanza di un apparato radicale ben ancorato e/o suolo sciolto/intriso d'acqua, la pianta può cedere sotto la forza peso del masso schiantando a terra, con emersione delle radici e liberazione di ulteriore detrito o, più semplicemente, assumendo un portamento inclinato con orientamento verso valle. Nelle conifere è frequente la rottura del cimale per le eccessive oscillazioni del fusto colpito; ciò generalmente non causa la morte della pianta ma ne compromette lo sviluppo con crescita anomala nel caso di giovani esemplari, chioma asimmetrica e disordinata negli esemplari maturi, di minor effetto protettivo per quanto concerne ulteriori crolli.

Collisioni laterali, in zona di scratch e impatti frontali di minor entità possono invece causare da escoriazioni superficiali con lacerazione della corteccia a profonde lesioni, in grado di compromettere seriamente il tessuto linfatico della pianta e l'alburno.

Nonostante l'apparenza, anche tipologie di danno a prima vista trascurabili possono comportare in molti casi la morte dell'esemplare colpito e l'instaurarsi di agenti patogeni primari e secondari. Ad esempio, è stato rilevato che le conifere rispetto alle latifoglie presentano una maggior sensibilità ai danni da impatto, con tassi di mortalità pari al 66% nel caso dell'abete bianco, contro il 23% dei decessi per il larice [Vospersnik, 2002; Brauner et al., 2005].

Indirettamente, a risentirne sarà anche la rinnovazione della foresta; continui crolli ne altereranno la struttura fino a impedirne lo sviluppo nel momento in cui la frequenza di rilascio del detrito sarà tale da rendere impossibile la vita nel sito, abbattendo le alberature di maggior diametro a protezione dei giovani semenzali.

3.4. POSIZIONE OTTIMALE DELLA FORESTA DI PROTEZIONE

Il reale potere di una foresta di protezione è strettamente correlato alla sua localizzazione nell'area di disturbo.

Lungo la zona di innesco, dove ha origine il fenomeno di rockfall, la presenza di una copertura arborea ha effetto positivo limitato alla capacità di mantenere aggregata la superficie, attraverso l'azione meccanica degli apparati radicali [Jahn, 1988; Gerber, 1998]; in egual modo, queste stesse radici, anche per azione chimica (reazione acida degli essudati radicali), possono indurre all'accelerazione dei processi di disgregazione della roccia; inoltre favorirebbero l'erosione operata dagli eventi atmosferici, con ampliamento dell'effetto della forza peso di neve e raffiche

di vento, con generazione di sradicamenti e ulteriori rilascio di detrito dagli apparati radicali affiorati.

L'entità negativa della vegetazione lungo l'area sorgente di rockfall è ben intuibile dalle parole di Jahn (1988), che definisce le radici degli alberi "cunei" all'interno delle discontinuità della roccia.

Numerosi studi hanno evidenziato che in seguito al distacco il masso acquisisce la massima velocità di corsa entro i primi 40 metri di discesa lungo il pendio non vegetato; oltre questo percorso è molto difficile intervenire nell'arresto del blocco [Gsteiger, 1993]. È opportuno quindi, avere una copertura vegetazionale entro i 40 metri dalla nicchia di distacco del rockfall; ottimale sarebbe non scendere oltre i 20 metri di distanza, al fine di non consentire al masso di caricarsi completamente di energia cinetica e di iniziare immediatamente la fase dissipativa attivata dalla foresta [Wasser e Frehner, 1996].

Molto diverso è il valore protettivo della foresta lungo la zona di transito o di passaggio del crollo di massi; è in quest'area che si assiste ad una vera azione di difesa operata attraverso la dissipazione dell'energia cinetica dell'evento, tramite urti e collisioni, la decelerazione del moto dei blocchi in corsa (fino al loro arresto) e la riduzione delle altezze di rimbalzo.

Essendo l'area di trasporto un versante solitamente caratterizzato da pendenze comprese tra 30°-40°, l'effetto barriera non è esclusivamente opera degli impatti tronco-roccia; al processo di dissipazione dell'energia contribuiscono la naturale diminuzione delle pendenze che porta verso il rotolamento del masso (inclinazioni inferiori a 30°) o ad una successione di rimbalzi (inclinazioni superiori ai 35°) con conseguente perdita di energia; intervengono poi rugosità del terreno, depositi di legname a terra, alberi abbattuti, massi penetrati al suolo, ammortizzamento della componente umica della superficie.

Nonostante la condizione di avere un numero idoneo di impatti tale da procurare l'intera dissipazione dell'energia cinetica del masso, a causa delle forti pendenze non è da escludere l'eventualità di un'ulteriore movimentazione del blocco verso il piede del versante.

Per quanto riguarda l'area di deposito, generalmente l'arresto dei massi avviene per condizioni di esaurimento dell'energia cinetica strettamente vincolati alla minor pendenza (inferiore ai 25°) che caratterizza tali settori e non tanto alla presenza di vegetazione. Ovviamente, in presenza di bassa energia cinetica, a seguito di un impatto sarà più alta la probabilità che il masso arresti la sua corsa posizionandosi a ridosso del tronco. Un buon effetto barriera sarà fornito anche dalla scabrezza del suolo e dalla presenza di materiale a terra (legname, ramaglia, detrito), in quanto è sufficiente un piccolo ostacolo per arrestare il moto del blocco roccioso, non più in grado di avanzare in altra direzione e/o superare l'impedimento con un rimbalzo.

3.5. REQUISITI IDEALI DELLA COMPOSIZIONE DELLA FORESTA DI PROTEZIONE

Una foresta di protezione diretta è in grado di adempiere pienamente la sua mansione solamente se rispetta alcune condizioni in relazione all'evento di disturbo.

L'area basale in bosco, ossia l'insieme di tutte le aree delle circonferenze delle piante misurate a petto d'uomo [m^2/ha], dovrebbe essere di almeno $10 \text{ m}^2/\text{ha}$ e salire fino a $25 \text{ m}^2/\text{ha}$ per una protezione ottimale, con densità tale da impedire lo sviluppo dell'evento ma garantire alla foresta stabilità e rinnovazione nel lungo periodo [Brang, 2001] con sostituzione delle eventuali piante danneggiate. Ciò implica la copresenza di variabilità di diametri e fasi di sviluppo nella stessa area; siffatto assetto forestale ad ampio raggio consentirà di bloccare sia i piccoli massi attraverso l'azione di piante più giovani, generalmente caratterizzate da densità maggiori e ceduate, sia i blocchi più pesanti grazie a fustaie mature, più o meno isolate, con diametri superiori.

Nel mosaico forestale assumono rilevante importanza non solo l'ampiezza dello strato forestale lungo la massima pendenza del versante oggetto di rockfall, ma anche la presenza quantitativa di *gaps* (piccole radure) e la loro estensione.

Quanto detto è dimostrabile dal fatto che il numero totale di impatti in foresta riveste maggiore importanza rispetto all'efficacia dell'urto singolo, espressa nella quantità di energia dissipata [Dorren et al., 2005].

In condizioni standard (33° - 40° di inclinazione) una valida foresta di protezione è in grado di assorbire una forza d'urto di 10.000 kg [Rickli et al., 2004], ridurre e stabilizzare le velocità di caduta dei massi intorno a 15 - 25 ms^{-1} , riducendo le altezze di rimbalzo dei blocchi a 1 - 2 metri dal suolo. Testimonianza del beneficio indotto dalla foresta è l'aumento della lunghezza di viaggio dei massi, in seguito alle deviazioni di traiettoria causati dagli scontri con i fusti delle piante e l'estensione della runout ($+20^\circ$) rispetto al suo asse normale.[Dorren et al., 2005; Jahn, 1988]

3.6. MODELLI DI QUANTIFICAZIONE DELL'ENERGIA

La stima dell'effetto di protezione di una foresta si è rivelata fin dal principio un'analisi complicata: non solo la capacità di dissipare l'energia cinetica è variabile da pianta a pianta, conferendo alla foresta un effetto finale medio, ma è anche molto difficile esaminare le connessioni tra tutti i fattori in gioco, replicare eventi di rockfall in laboratorio e/o effettuare indagini dirette in campo, dal momento che si tratta di eventi imprevedibili nel brevissimo periodo e solitamente localizzati in siti poco accessibili.

Le ricerche iniziate alla fine dello scorso secolo hanno preso il via con sperimentazioni in campo di crolli artificiali su tronchi di abete bianco privi di nodi con prove standardizzate di impatto dinamico [Couvreur, 1982; Zinggeler, 1990].

Successivamente sono state introdotte sperimentazioni dirette alla quantificazione dell'energia cinetica potenzialmente dissipabile dal fusto delle piante, attraverso l'impiego di vericello [Stokes et al., 2005], secondo la teoria che attribuisce unicamente al tronco la capacità di assorbire e consumare la forza dei massi attraverso una serie di oscillazioni, più o meno grandi, dell'intera pianta (concezione che sembra trovare riscontro nella perdita del cimale delle conifere in seguito all'impatto) [Brauner et al., 2005].

Con l'evoluzione della tecnologia hanno subito un incremento anche le osservazioni dirette di eventi di rockfall nonché lo studio di simulazioni su pendio naturale. Ne sono una prova le sperimentazioni in campo di Dorren e Berger (2006), che hanno fornito risultati completi, capaci di considerare integralmente le numerose interazioni radice-suolo-fusto.

A seguito delle conoscenze ottenute il passo per l'applicazione di modelli di calcolo è stato breve.

Attualmente sono presenti due classi di metodi:

- 1) *strumenti per la valutazione rapida*: MTFD;
- 2) *modelli di simulazione in 2D e 3D*: interpolazione di dati raccolti in campo e informazioni fornite da tecniche di remote sensing, capaci di supplire alle varie difficoltà riscontrabili nello studio di fenomeni di rockfalls (impossibilità di raggiungere il sito di crollo, problematicità della riproduzione a piccola scala, elevati tempi e costi di raccolta e analisi dei dati, etc.).

Si tratta di software capaci di ricreare simulazioni di eventi di crollo sulla base dei dati di input forniti dall'operatore, raccolti direttamente in campo ove possibile, o ricavati da immagini satellitari e modelli GIS del terreno; necessitano di vari tentativi prima di arrivare alla più realistica rappresentazione del/la rockfall, convalidata dalla corrispondenza con la distribuzione dei depositi registrati al piede del versante oggetto di crollo, altezze di rottura dei fusti, entità dei danni riscontrati.

Operano sia a scala locale che a livello regionale, con evidenti vantaggi per quanto riguarda manodopera e oneri, aumentando notevolmente l'accuratezza del dato spaziale, come distribuzione della copertura forestale, ripartizione dei DBH e delle specie vegetali.

Tuttora in sperimentazione, prevedono l'ausilio di ulteriori modelli capaci di analizzare nel lungo periodo anche l'effetto di ripresa della foresta in seguito allo stress prodotto dai crolli di massi [Botkin et al., 1972], considerando incremento diametrico delle piante, resilienza e tasso di rinnovazione, utile a capire se la vegetazione sarà in grado di mantenere la sua funzionalità protettiva nel corso degli anni.

Tra questi vi sono i modelli di crescita delle foreste di Bugmann (2001), Ramming et al. (2006), utili alla direzione dei programmi selvicolturali futuri e le simulazioni di crescita post-disturbo PICUS (Woltjer, 2007), per il recupero a lungo termine e il mantenimento della stabilità in bosco.

Tali strumenti vanno affiancati a software orientati allo studio del fenomeno per quanto concerne l'evento di crollo, come il modello Rockyfor3D.

4.1. MATERIALI E METODI

Il seguente capitolo ha lo scopo di descrivere ed analizzare i risultati ottenuti attraverso l'impiego del software di simulazione tridimensionale Rockyfor3D, utilizzato al fine di evidenziare l'evoluzione dell'evento di rockfall in ambiente dolomitico, sia in presenza di copertura forestale che lungo versanti scoperti.

Nello specifico è stata selezionata come scenario del fenomeno di crollo l'area di studio di Vodo di Cadore (BL), le cui caratteristiche morfologiche sono state raccolte e rielaborate come database per molteplici simulazioni di lanci, valutandone entrambe le soluzioni (con e senza soprassuolo forestale) e cercando di definire la magnitudo del crollo, nonché la distribuzione del rischio sul versante.

4.2. AREA DI STUDIO

L'area di studio dell'evento del crollo di roccia in analisi è individuabile presso l'ambito geografico delle Dolomiti Cadorine, alle pendici meridionali del Monte Antelao (3.264 m), in sinistra idrografica del bacino del torrente Rudan, presso la località Pian de la Fontaneles sotto nel Comune di Vodo di Cadore (BL).

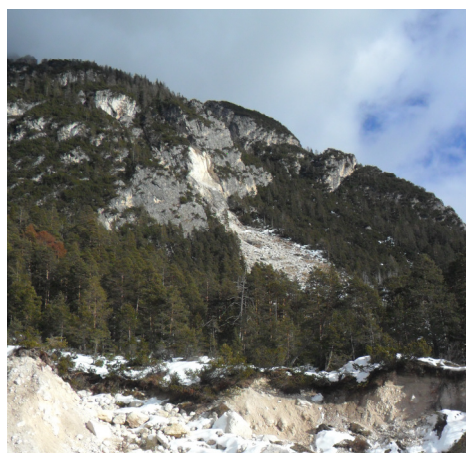


Figura 10: inquadramento geografico del caso di studio; a destra, vista laterale dell'area interessata dall'evento di rockfall.

Il sito si estende su 2,3 ettari di superficie che si sviluppano a partire da 1.500 fino a 1.700 metri s.l.m. di altitudine, con una pendenza media di $21,5^\circ (\pm 13^\circ)$ e un'esposizione prevalente con orientazione sud-sudest, che garantisce una buona insolazione annua (superiore alle 1.800 ore). La zona ricade all'interno delle particelle forestali destinate alla funzione di protezione forestale di II livello. Infatti, sulla stazione, come per gran parte del versante meridionale del monte Antelao, il Servizio per la Ricerca e la Pianificazione Forestale ha indicato la presenza di

numerosi eventi di valanga e movimenti franosi, mentre pressione turistica e danni da pascolo sono risultati del tutto irrilevanti: infrastrutture e viabilità principale e secondaria risultano assenti.

4.2.1. INQUADRAMENTO CLIMATICO CLIMA

Il comprensorio del bacino idrografico del torrente Rudan, al cui interno in sinistra idrografica si estende il sito caso di studio, è particolarmente influenzato dalle caratteristiche geologiche del versante australe dell'Antelao, massiccio roccioso di appartenenza.

Dal punto di vista climatico, l'area ricade nella fascia climatica temperato fredda, distretto mesalpico, fascia fitoclimatica del *Picetum*, ed è caratterizzata da precipitazioni medie pari 1.000-1.380 mm all'anno con un minimo pluviometrico che si verifica nella stagione invernale (mesi di gennaio-febbraio) ed un massimo pluviometrico che si verifica a partire dalla stagione primaverile fino al termine del periodo estivo, con un'ultima ripresa nei mesi di ottobre e novembre. Le temperature medie annue sono comprese tra 1° e 7°C, mentre il gradiente termico è stimato attorno a 0,50 °C per ogni 100 metri s.l.m. di dislivello.

4.2.2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Di origine norica e liassica, il massiccio dell'Antelao assume un aspetto compatto e robusto nonostante la notevole presenza di profonde incisioni e la successione di alti canaloni e pareti calcareo-dolomitiche sub verticali. Come avviene nelle aree dolomitiche, l'Antelao presenta una stratigrafia composta da antiche formazioni di arenaria, Bellerophon e Werfen (complesso calcareo-marnoso-tufaceo fittamente stratificato), basamento di Ladinico (calcarei bituminosi, calcari selciosi molto stratificati, calcari lastriformi), Carnico (marne grigio-chiare, dolomie e calcari dolomitici, dalla tinta biancastra o rosea), Norico (trias inferiore, bancate di dolomia principale) e Lias (strati ciclici amalgamati di calcari grigi). La parte inferiore del bacino è caratterizzata da tali formazioni di origine essenzialmente vulcanica o comunque non organogena.

Il complesso montuoso ha forma asimmetrica per l'orogenesi che ne ha portato all'immersione degli strati orientati verso nord (dolomitici), con inclinazioni tra i 30 e i 50 gradi [Leonardi, 1967], a causa dell'elevata attività tettonica che predomina sulla regione e delle numerose faglie di scorrimento dislocate lungo il territorio.

Ciò ha conferito uno scombinamento dell'assetto stratigrafico originario del monte, sia in senso verticale che laterale, manifestatosi in superficie in una situazione di forti disturbi di dissesto da scagliamento locale e dislocazioni trasversali delle pareti rocciose, da cui affiorano formazioni di roccia madre, in grado di liberare grandi quantitativi di materiale attraverso diverse forme di

frane e, in taluni casi, debris flow [Panizza et al, 1998]. Quanto detto è tipico del versante cadorino dell'Antelao, nonché del canale in cui scorre il torrente Rudan, ad un centinaio di metri dall'area di studio, e soggetto a suddette manifestazioni già a partire dal periodo glaciale.

Per quanto concerne più precisamente l'area di studio, in linea con la stratigrafia del massiccio dell'Antelao, la geologia del sito è costituita da una serie di depositi eluviali, colluviali, detritici e di frana appartenenti al Quaternario. Nel sottosuolo si trovano quindi ben distribuite matrici di detrito sciolto, talora cementati, caratterizzati da una notevole eterogeneità granulometrica.

Tali forme litologiche hanno aspetto poco elaborato e si alternano occasionalmente a coltri di alterazione limosa o argillosa.

In siffatte condizioni, l'orogenesi ha portato alla formazioni di suoli poco profondi (non inferiori a 30 centimetri), del tipo *rankers* e *redzina*, caratteristico delle pinete di pino silvestre, con umidità pressoché scarsa e *pH* tendenzialmente acido con una componente humica costituita da elementi grezzi (torba).

4.2.3. INQUADRAMENTO FORESTALE

Il sito d'esame ricade all'interno di una particella forestale governata secondo quanto stabilito dalla Magnifica Regola Grande e Staccata dei Piani di Riassetto e Riordino del Comune di Vodo di Cadore. Come già indicato, il popolamento forestale appartiene alla categoria delle Foreste di Protezione di II livello, ossia destinate ad un'azione di salvaguardia generale dei versanti con inclinazioni superiori ai 30°. Come accade di norma, tali foreste non sono sottoposte a gestione selvicolturale programmata; presentando quindi un assestamento forestale tendenzialmente libero, dettato dalle condizioni naturali di sviluppo del bosco.

Ciò ha in parte favorito nel corso degli anni il manifestarsi di numerosi e frequenti attacchi parassitari ad opera di agenti scolitidi e cerambicidi [Faccoli, 2010], aggravato innanzitutto dal perenne stato di stress edafico a cui sono sottoposte le piante.

Le condizioni stazionali sono tali da abbassare lo stato fitosanitario del bosco ad un livello mediocre. Solo ai piedi del versante, dove le pendenze si addolciscono permettendo un accesso più agevole ai mezzi, sono presenti particelle sottoposte a regolare attività selvicolturale.

Salendo in direzione dell'area di studio si possono incontrare in successione:

- Pecceta secondaria montana, con una densità di copertura pari a 71-100%;
- Pineta di *Pinus sylvestris* mesalpica, in consociazione con *Picea abies*, con densità di copertura pari a 71-100%;
- Mugheta micorterma basifila, con densità di copertura pari a 31-70%;
- Lariceta primitiva (lariceti e larici-cembreti) con densità di copertura pari a 10-30%.

Per quanto concerne il sito esaminato, si assiste ad una distribuzione del soprassuolo caratterizzata per l'85% da pino silvestre e il restante 15% da abete rosso.

La fustaia di pino silvestre assume una copertura molto inferiore a quella censita al di fuori dell'area, in risposta alla combinazione di una molteplicità di fattori: in primis l'elevata mortalità è dovuta direttamente all'evento di rockfall e alla presenza di attacco parassitario ad opera di agenti scoltidi e ceramibici e, indirettamente, alla manifestazione di stress di origine edafica; condizionata da suddetti elementi, la densità del popolamento si abbassa fino a raggiungere valori del 20-30%. Inoltre, è stata rilevata una composizione specifica caratterizzata dalla sporadica presenza di:

Faggio (*Fagus sylvatica*, L.), Pino cembro (*Pinus cembra*, L.1753), Pino mugo (*Pinus mugo*, Turra, 1764), Sorbo degli uccellatori (*Sorbus aucuparia*, L.1753).

4.3. DESCRIZIONE DELL'EVENTO DI ROCKFALL

L'area di studio è stata recentemente interessata da un crollo di roccia, evento non insolito, in quanto il sito presenta tracce di disturbo attribuibili a fenomeni di dissesto passati.

La liberazione di materiale ha avuto origine a metà costa della parete verticale rocciosa a monte del sito, composta da dolomia principale e calcare grigio. L'identificazione dell'area sorgente è pressoché certa, grazie alla colorazione chiara del calcare nella concavità di distacco, il quale assume la comune gradazione scura solo col passare del tempo e sotto l'azione degli agenti atmosferici [Friedel, 1935] (gradazione da giallo-biancastra a grigio scuro nell'arco di 5 anni).

Innesco ed evoluzione del crollo sono stati dominati essenzialmente dalla gravità.

Dalla parete è ipotizzabile un distacco ad opera di grossi blocchi di roccia lungo i piani di debolezza del complesso, causato dalle condizioni di gelo-disgelo e favoriti dall'esposizione a meridione del versante. Su tale base, non avendo effettuato una datazione, è verosimile localizzare il crollo nella stagione primaverile.

La dinamica del crollo è stata presumibilmente quella tipica degli eventi di *rockfall*, ovvero blocchi di roccia liberati dalla parete rocciosa subverticale che, dopo una prima caduta libera in aria, hanno impattato al suolo, incontrando uno spesso strato di detrito sciolto con una prima frantumazione dei massi più grossi, ed una conseguente riduzione delle volumetrie; il moto è poi proseguito verso valle con movimenti rotatori e rimbalzi, fino ad arrestarsi per effetto della dissipazione energetica. Lungo il versante sono stati inoltre evidenziate buche e concavità nel terreno, riconducibili all'impatto al suolo in seguito al rimbalzo delle rocce. Nella discesa, lungo la parte di pendio identificabile come zona di trasporto dell'evento, si sono verificati numerosi impatti contro la vegetazione, testimoniati da lesioni e rotture che, con la rugosità del terreno, conseguente alla presenza di accumuli caotici sia di legname a terra che di massi di piccole e

medie dimensioni, insieme alle locali diminuzioni di pendenza, hanno favorito in parte una riduzione delle velocità dei massi.

L'effetto della foresta per quanto concerne il soprassuolo è evidente nella componente di massi bloccati a monte o in prossimità dei tronchi.

Come accade di frequente, la zona di transito e la zona di arresto tendono a sovrapporsi, immagazzinando detrito potenzialmente mobilizzabile (liberabile in seguito alla decomposizione del materiale legnoso che funge da elemento di ritenuta temporaneo o per spinta da parte di ulteriore blocco in caduta).

L'azione combinata di suolo e foresta è stata inefficace per i massi di volumetrie maggiori; questi sono infatti andati a depositarsi nelle zone più lontane del sito di indagine, depositandosi per l'esaurimento dell'energia cinetica.



Figura 11: massi depositati in zona di trasporto (a sinistra) e blocchi rocciosi di maggior volume, giunti fino al piede del versante (a destra).

4.4. RILIEVI DI CAMPO

Tale capitolo ha lo scopo di presentare l'attività svolta direttamente in campo, atta alla raccolta dei dati necessari al software Rockyfor3D per la realizzazione delle simulazioni tridimensionali dell'evento di rockfall attivo nell'area di studio, secondo le indicazioni fornite dalla guida del modello [Dorren, 2012] e di altre informazioni a carattere descrittivo dello specifico evento analizzato.

Al fine di agevolare l'operazione di raccolta dei dati sono state realizzate una serie di tabelle, o schede di campo, compilabili direttamente sul sito disturbato.

L'attenzione è stata focalizzata sul campionamento del soprassuolo forestale vivo e morto, con particolare attenzione alle piante contraddistinte da lesioni corticali e/o danni superiori (schianti, rotture del tronco, perdita del cimale) e alla componente rocciosa, specialmente se associabile ipoteticamente alle ferite, in quanto si veniva a trovare in prossimità della vegetazione danneggiata.

Parte dell'attività in campo si è poi spostata all'analisi delle caratteristiche morfologiche del sito, necessarie alla definizione degli input richiesti da Rockyfor3D atti a quantificare le serie di azioni dissipative opposte al moto di caduta dei massi durante l'evento di crollo.

Come già accennato, l'impossibilità di adottare tecniche di censimento forestale tramite remote sensing per assenza di immagini multispettrali e Lidar, è stata sopperita attraverso il censimento totale del soprassuolo forestale interessato del crollo e il rilievo parziale attraverso un'area di campionamento per quanto riguardava la vegetazione all'esterno del sito in una zona non disturbata.

Per quanto concerne la formazione forestale e le forme di governo, l'informazione è stata tralasciata in quanto è dato certo che sul sito sussiste una copertura assegnata alla categoria di foresta di protezione di II grado, sprovvista perciò di cure culturali, caratterizzata naturalmente dalla forma a fustaia, essendo una pineta.

4.4.1. IDENTIFICAZIONE DELLE AREE DI SAGGIO E RILIEVO DELLA COMPONENTE FORESTALE

Successivamente ad una prima verifica in loco della distribuzione spaziale del fenomeno di crollo sono state individuate la zona di innesco, la zona di transito e la zona di arresto.

La zona di innesco, in quanto corrispondente ad una parete quasi verticale dalla quale si è venuto ad originare il distacco del materiale roccioso, è stata semplicemente sottoposta a misure relative alla grandezza della concavità formatasi col crollo, ben visibile a colpo d'occhio per la diversa colorazione dei calcari grigi, allo scopo di effettuare una stima ipotetica della cubatura del detrito liberato. Oltre alla lunghezza dell'area sorgente è stata misurata la sua altezza da terra, parametro particolarmente influente nelle simulazioni tridimensionali di Rockyfor3D, e la durezza del suolo al piede della parete, luogo primario di impatto dei blocchi rocciosi distaccatisi.

Le zone di transito e deposito sono state sottoposte ad uguale procedimento dal momento che presentavano condizioni stazionali molto simili.

Come già evidenziato nel precedente capitolo, al fine di comprendere al meglio l'evento di disturbo, è stato realizzato un censimento forestale sia in area disturbata, direttamente colpita dal crollo, che sulla restante superficie "non disturbata".

4.2.1.1. AREA DISTURBATA

Per realizzare correttamente il rilievo, l'area di studio è stata suddivisa in quattro zone, ripartite uniformemente lungo il versante, partendo da monte verso valle. Per ciascuna di esse è stata eseguita una stazione, generalmente in un punto baricentrico dell'area campionata, e la posizione dei singoli fusti e/o massi è stata acquisita utilizzando un distanziometro laser. Ad ogni spostamento verso la successiva stazione si sono eseguite le letture delle stazioni "indietro" e "avanti" per consentire la restituzione completa ed organica del rilievo.

Nello specifico, è stato eseguito un censimento totale della componente forestale nella zona di scorrimento ed arresto; ad ogni pianta in piedi, sia viva che morta, sono state acquisite: la sua posizione, lo stato vegetativo, il diametro della circonferenza misurato a petto d'uomo, con cavalletto dendrometrico. La raccolta dei diametri si è protratta anche al di sotto della comune soglia di 17,5 centimetri, in quanto è stato dimostrato che anche diametri di 12,5 centimetri risultano essere utili nell'ostacolare la caduta di massi e, a tale proposito, Rockyfor3D impiega nelle sue simulazioni vegetazione fino a 10 centimetri di diametro. Successivamente, indirettamente sono stati ricavati densità forestale, diametro medio e composizione forestale.

Particolare attenzione è stata dedicata al campionamento dei danni imputabili al crollo di roccia; le lesioni sono state classificate per gravità secondo l'ordine:

- a) rami rotti: piante prive di parti di chioma;
- b) lesioni; queste a loro volta sono state distinte in:
 - lievi: scalfittura della corteccia prolungata fino al cambio, di estensione ridotta;
 - moderate: escoriazione del tronco di profondità superiore a 2-3 centimetri o di superficie ampia, tale da compromettere lo stato fitosanitario della pianta colpita;
 - gravi: lesioni profonde con elevate emissioni di resina, legno sfibracciato e seriamente compromesso per ampie lunghezze, seriamente pregiudicati i vasi linfatici, elevato rischio di mortalità per la pianta.
- c) cimatura: perdita del cimale per forte impatto al piede del tronco e/o in seguito ad elevate altezze di rimbalzo del masso;
- d) inclinazione: pianta con assetto verticale spostato a valle in seguito alla collisione con il masso;
- e) schianto: pianta a terra per resistenza inferiore all'energia cinetica del masso, con apparato radicale scoperto;
- f) stroncamento: pianta spezzata ad una certa altezza da terra; esito generalmente letale per le arboree di maggiori dimensioni, soprattutto nel caso delle conifere; possibilità di ripresa per la rinnovazione e le piante di piccolo diametro ancora in formazione.

Il danno è stato poi identificato anche mediante la sua posizione sul tronco rispetto all'altezza da terra.

Simile procedura è stata applicata per i tronchi a terra e le porzioni di legname abbattuto e dislocato lungo il versante. La presenza di numerose piante morte in piedi ha reso difficoltoso il riconoscimento della specie nel caso delle due conifere.

4.2.1.2. AREA “NON DISTURBATA”

Il rilievo del soprassuolo in zona non disturbata, ossia esterna alla superficie del versante interessata dal fenomeno di crollo, è stato definito attraverso un campionamento parziale effettuando un'area di saggio della foresta.

L'operazione ha avuto inizio mediante l'individuazione di un'area campione di caratteristiche idonee a rappresentare statisticamente l'intero popolamento e avvenuta “a tavolino” dall'analisi delle ortofoto. La dimensione dell'area di saggio è stata scelta di forma quadrata, con lato 20 m e una superficie pari a 400 m²; al fine di ottenere esattamente vertici ad angolo retto si è impiegato un metodo comunemente usato durante i censimenti forestali, di origine storica, che sfrutta le proprietà del teorema di Pitagora: fissati due lati congiunti del quadrato dell'area, l'angolo che viene a

formarsi sarà di esatti 90° solo quando l'ipotenusa ricavabile unendo le due parti alle lunghezze di 4 metri l'una e 3 metri l'altra, sarà di 5 metri. La superficie così ottenuta è esattamente pari a ¼ di ettaro e darà il valore totale a 10.000 m² semplicemente in seguito alla sua moltiplicazione.

Similarmente a quanto effettuato nel precedente rilievo forestale, sono stati misurati diametri dendrometrici e altezze delle piante, definendo specie e stato vegetativo.

4.4.2. CAMPIONAMENTO DEI BLOCCHI DI ROCCIA DEL SITO E RILEVAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE DEL VERSANTE

Il rilievo dei massi, come avvenuto per il censimento forestale, è stato organizzato sulla base di quanto stabilito dalle indicazioni previste per l'utilizzo di Rockyfor3D.

Sono stati identificati i massi più rappresentativi dell'area di studio e il masso con le dimensioni maggiori. A questi sono stati rilevati i tre diametri (maggiore, minore ed intermedio, come richiesto dalla guida) attraverso cavalletto dendrometrico ove possibile e metro ripiegabile.

Sulla base della conformazione di tali massi campione, è stata selezionata la forma complessiva dei blocchi presenti nella stazione.

Per la fase di campionamento delle rocce è stato scelto di incrementare ulteriormente i dati attraverso il censimento di tutti i massi localizzati in prossimità di piante danneggiate e legname a terra di dimensioni rilevanti, allo scopo di definire secondariamente le energie in gioco e le probabili relazioni di danno masso-foresta.

A tale proposito i massi prescelti sono stati misurati nei loro tre diametri e localizzati attraverso le coordinate geografiche; in questo modo è stato possibile ottenere una mappatura delle piante lesionate con entità della ferita e probabile masso responsabile.

4.5. SIMULAZIONE DEL FENOMENO DI CROLLO CON IL CODICE ROCKYFOR3D

Sulla base della rappresentazione digitalizzata del versante ottenuta dalla raccolta dei dati in campo, è stata inizializzata la procedura di creazione simulata delle traiettorie tridimensionali di caduta massi attraverso il programma di simulazione Rockyfor3D.

Successivamente alla creazione dei rasters di input necessari al funzionamento del software, relativi alle caratteristiche dell'area di innesco, alla geologia del suolo e alla tipologia di detrito liberato, è stato possibile ottenere come output lo sviluppo dell'evento di crollo lungo il versante analizzato, secondo le traiettorie di caduta maggiormente compatibili ad un reale fenomeno di rockfall.

4.5.1. PREPARAZIONE DELLO SCENARIO

Come già mostrato, i dati acquisiti nel corso dei rilievi di campo sono stati impiegati per la preparazione delle mappe di input necessarie alla simulazione tridimensionale del crollo.

Attraverso di essi è prevista la creazione di un database costituito da un minimo di dieci mappe raster in formato "*Ersi ASCII Grid*" per le simulazioni del processo senza foresta, ed in numero superiore nel caso in cui fosse implementato l'effetto dissipativo operato dalla componente forestale.

4.5.1.1. DESCRIZIONE E CREAZIONE DEI RASTERS DI INPUT

Mediante questa operazione sono state realizzate le mappe raster necessarie al funzionamento del programma; ogni raster prodotto e convertito secondo l'estensione richiesta da Rockyfor3D è stato di basilare importanza per il calcolo delle traiettorie di caduta tridimensionali

1) Individuazione delle aree sorgenti

La corretta analisi delle aree sorgenti richiederebbe un vaglio approfondito delle caratteristiche litologiche e stratigrafiche della superficie rocciosa dell'area, nonché la suscettibilità ai fattori predisponenti un innesco di crollo.

Secondo Barton (1978) è possibile definire una soglia di pendenza, oltre la quale si possono distinguere le potenziali aree sorgenti di frana rispetto ad un ripido versante stabile, in relazione al tipo di materiale presente ed in considerazione unicamente della sollecitazione operata dalla forza di gravità.

Sulla base di quanto sopraccitato, l'identificazione di tutte le aree sorgenti si è avvalsa dello strumento "Raster Calculator", individuando tutte le celle caratterizzate da una pendenza maggiore del valore soglia (α) definito dalla formula [21], in funzione della risoluzione (RES) del raster.

$$\alpha = 55^\circ \cdot RES^{-0,075} \quad [24]$$

Con la risoluzione di un metro utilizzata nel presente lavoro, il valore soglia è rappresentato dai 55° . Si è quindi ritenuto utile completare la delimitazione delle superficie di rilascio del materiale, operando manualmente una filtrazione dei risultati; questo, al fine di escludere alcune delle aree che, nonostante fossero evidenziate perché superiori al gradiente di soglia, non presentavano alcuna attività recente e/o prossima al momento delle analisi ed era inutile la loro valutazione.

Quindi, sulla base del raster delle aree sorgenti, sono stati prodotti i seguenti file ASCII:

- "*rockdensity.asc*", necessario alla definizione del peso specifico del sedimento delle aree sorgenti; come già menzionato, suddetto caso di studio riguarda rocce costituite da Dolomia principale, con densità di 2.850 kg/m^3 ;
- "*d1.asc*", "*d2.asc*", "*d3.asc*", i quali permettono di descrivere la forma geometrica dei massi; i valori settati sono stati scelti sulla base dei diametri emersi dai rilievi di campo;
- "*blshape.asc*", raster attraverso il quale viene definita la forma del blocco di roccia, assunta in questo caso rettangolare, sulla base di quanto rilevato in campo.

2) Rappresentazione del soprassuolo: creazione del *treefile.txt* e dei parametri di copertura forestale

Il *treefile.txt* consiste in un documento di testo contenente le coordinate x e y di ogni singola pianta e il corrispondente diametro (in centimetri) che può venire creato nel caso in cui non siano presenti i raster relativi alla copertura forestale (*nrtree.asc*, *dbhmean.asc* e *dbhstd.asc*.) oppure può essere fornito come dato di input al programma. Nel presente caso di studio si è scelto di creare il file raster, in quanto i dati raccolti in campo sono affetti dagli errori sistematici derivanti dagli strumenti di misura impiegati (GPS, per la georeferenziazione, e distanziometro laser, per l'acquisizione dei dati spaziali delle piante).

I valori relativi a diametro medio (*dbhmean.asc*), deviazione standard dei diametri (*dbhstd.asc*), densità forestale e percentuale di conifere sono stati assegnati sulla base dei rilievi di campo, utilizzando il software ArcMap e ricorrendo alla perimetrazione di quattro *features*:

- poligono 1: area di disturbo, non comprensiva della zona di innesco;
- poligono 2: intera maschera, ad esclusione del canale del torrente;
- poligono 3 e 4: canale del torrente ed area di innesco.

La definizione di un poligono relativo alla superficie occupata dal canale e alla zona di innesco hanno reso molto più accurato il risultato finale delle simulazioni, in modo che tali elementi non venissero compresi nella copertura forestale utile alla dissipazione dell'energia cinetica dei massi.

Ad ogni poligono sono stati assegnati i parametri relativi alla vegetazione attraverso la tavola degli attributi.

Le *features* così create sono state successivamente convertite in raster, attraverso la funzione "*feature to raster*" del software ArcMap, ed infine mutate di estensione mediante l'opzione "Raster to Ascii" secondo quanto richiesto da Rockyfor3D per l'elaborazione delle traiettorie.

3) Morfologia del versante: indice MOH e Tipologia del suolo

Nella definizione delle caratteristiche del suolo, il valore di MOH è stato ottenuto con la preparazione delle relative percentuali rg (*rg10.asc* per il 10%, *rg20.asc* per il 20%, *rg70.asc* per il 70%) all'interno della maschera, individuando 4 aree e procedendo per confronto fotografico, come indicato dal manuale di guida del software:

- Crollo: superficie compresa dalla sorgente di crollo all'inizio della copertura forestale;
- Crollo/arresto: superficie comprendente la fascia di vegetazione fino alla zona di arresto;
- Bosco: area circostante le due sezioni sopraccitate;
- Canale: elemento idrico del versante.

Infine è stato definito il parametro del *soiltype.asc* ossia il valore relativo alla descrizione del grado di compattezza del suolo, in riferimento al possibile livello di penetrazione del masso nel terreno durante l'impatto al suolo.

In questo caso, sulla base delle indicazioni fornite dal manuale sono stati attribuiti valori di 3 ("*terreno compatto di medie dimensioni, ghiaione di diametro inferiore ai 10 centimetri; strada forestale*") e all'occorrenza 4 ("*terreno compatto e frazione detritica, ghiaione con diametro superiore 10 centimetri*") all'area direttamente interessata dal crollo, crollo/trasporto e bosco; al canale è stato assegnato un valore di 1 ("*sedimento fine, penetrazione oltre i 100 centimetri*") e alla parete un valore di 6 ("*suolo roccioso compatto*").

4.5.2. APPLICAZIONE DEL SOFTWARE

La fase di predisposizione degli input del software impone di attenersi con riguardo alla procedura standard descritta nel manuale, ponendo particolare attenzione all'omogeneità dei dati che devono mantenersi delle medesime dimensioni in estensione e risoluzione; molta più libertà viene assegnata alla fase di avvio della simulazione, attraverso un'interfaccia grafica dove all'operatore viene concessa la possibilità di variare alcuni dei parametri relativi alle caratteristiche dell'evento di crollo, capaci di comprendere in parte anche la componente casuale del fenomeno; tra questi trovano spazio il numero delle simulazioni, la variazione del volume dei blocchi di roccia (da $\pm 0\%$ a $\pm 50\%$), l'altezza di caduta iniziale e la foresta (presente o assente). Nel caso in cui si voglia analizzare l'effetto protettivo di opere di ritenuta è possibile inserire anche barriere paramassi (presente o assente).

In suddetto caso Rockyfor3D è stato impiegato per la realizzazione di 14 simulazioni di rockfall, destinate all'analisi dell'evento di crollo applicato a diverse circostanze.

Le simulazioni sono state proposte sia in presenza di copertura forestale che su versante nudo, per le risoluzioni a 1 metro, a 2 metri e a 5 metri, introducendo variazioni nell'altezza iniziale di caduta a 0 metri, 20 metri e 50 metri dal suolo; sono state applicate inoltre variazioni nella percentuale dei volumi dei blocchi di roccia, a $-/+0\%$ e $-/+50\%$. Il numero di lanci utilizzato è variato da 1 a 100.

Successivamente ad una selezione dei risultati sono stati scelti i seguenti scenari, volti all'analisi di tre diversi aspetti caratterizzanti l'evoluzione del crollo di roccia:

A) Scenario 1: analisi dell'effetto della riduzione dei lanci nell'evento di rockfall

- Simulazioni R01_senza foresta (riproposte a 1, 10 e 100 lanci): set di simulazioni prodotte su versante privo di copertura forestale, al fine di analizzare la diversa risposta alla variazione di fattore applicata al numero di lanci nel medesimo ambiente;
- Simulazioni R01_foresta (riproposte a 1, 10 e 100 lanci): set di simulazioni prodotte in presenza di copertura forestale in condizioni di normalità, aventi lo scopo di esaminare la diversa risposta generata dalla variazione del numero di lanci utilizzati nel medesimo ambiente e come forma di paragone rispetto alla situazione priva di soprassuolo.

B) Scenario 2: analisi dell'effetto della foresta per l'evento di rockfall applicato in circostanze opposte (ante e post-disturbo)

- Simulazioni R02_foresta normale: rockfall simulato su versante caratterizzato da copertura forestale in buono stato, ipotizzabile in una situazione antecedente all'avvenuta del crollo;
- Simulazioni R02_foresta disturbata: simulazione prodotta in ambiente compromesso, con soprassuolo in forte stato di stress, ipotizzabile in situazione post-crollo.

C) Scenario 3: analisi dell'effetto della scabrezza del suolo nell'evento di rockfall

- Simulazioni R03_foresta normale_I: evento di rockfall prodotto su versante caratterizzato da buona copertura forestale e livello base di rugosità del suolo;
- Simulazioni R03_foresta normale_II: evento di rockfall prodotto su versante caratterizzato da buona copertura forestale e livello medio di rugosità del suolo;
- Simulazioni R03_foresta normale_III: evento di rockfall prodotto su versante caratterizzato da buona copertura forestale e livello elevato di rugosità del suolo;
- Simulazioni R04_suolo nudo_I: evento di rockfall prodotto su versante caratterizzato da assenza di copertura forestale e livello base di rugosità del suolo; set di raffronto alla simulazione R03_foresta normale_I;
- Simulazioni R04_suolo nudo_II: evento di rockfall prodotto su versante caratterizzato da assenza di copertura forestale e livello medio di rugosità del suolo; set di raffronto alla simulazione R03_foresta normale_II;
- Simulazioni R04_suolo nudo_III: evento di rockfall prodotto su versante caratterizzato da assenza di copertura forestale e livello elevato di rugosità del suolo; set di raffronto alla simulazione R03_foresta normale_III.

5. RISULTATI

L'approfondimento dell'evoluzione del rockfall verificatosi sul versante del monte Antelao è stato indirizzato ad uno studio tangibile dell'effetto diretto causato dal disturbo contro la vegetazione, sulla base dei censimenti realizzati in campo e ad una parte sperimentale, impostata sull'analisi di simulazioni tridimensionali dell'evento di crollo in differenti circostanze.

5.2. DINAMIACA DEL CROLLO DI MASSI SULLA COPERTURA FORESTALE

Alla base del seguente capitolo vi è l'intenzione di approfondire l'analisi dei danni causati dal crollo di roccia alla componente forestale dell'area di studio e di determinare la risposta delle piante, come azione meccanica volta al rallentamento e alla cessazione del moto in caduta dei blocchi di roccia.

Tale operazione è stata possibile in quanto una parte dei rilievi forestali è stata dedicata alla raccolta e al campionamento delle lesioni riscontrate sui tronchi delle piante, attribuibili al passaggio dei massi. Per ulteriori approfondimenti sullo svolgimento del rilievo si veda il capitolo 4.2.1.1.

5.2.1. ANALISI DEGLI EFFETTI DEL CROLLO DI ROCCIA SUL POPOLAMENTO

Il censimento del popolamento forestale nell'area interessata dal crollo ha evidenziato la presenza di 219 individui, di diametro superiore a 0,6 cm, composto dal 39,7% di *Pinus sylvestris*, 19,6% di *Picea abies*, 1,8% di *Sorbus aucuparia* ed un restante 38,8% di specie ignota (conifera), a causa dell'elevato stato di degrado del legno che non ha permesso un riconoscimento certo; è presumibile in ogni caso che si tratti di pino silvestre, il maggior esponente del versante

Un primo effetto dell'azione di disturbo causata dal crollo e del probabile attacco parassitario ad opera dello scolitide *Ips acuminatus*, si è manifestata in seguito alla quantificazione della componente viva della copertura forestale e di quella morta, ammontante rispettivamente al 40,18% (con 88 individui vivi) e al 59,82% (pari a 131 individui deceduti).

Come atteso, gran parte della mortalità ha interessato la specie *Pinus sylvestris* (49,4%), caratterizzata da elevata suscettibilità ai danni corticali, che evolvono generalmente in marciumi e fungono da vettori di attacco parassitario, dall'esito letale; al contrario, l'abete rosso ha rivelato una maggior resistenza che ha portato appena il 7% di perdite.

Un elevato valore di mortalità è stato riscontrato anche per la componente forestale non identificata, presumibilmente appartenente sempre all'ordine delle gimnosperme. Nonostante la bassissima presenza all'interno dell'area, la specie *Sorbus aucuparia* ha avvalorato le consapevolezze sulla superiorità delle latifoglie rispetto alle conifere, per quanto concerne la resistenza contro gli eventi di crollo di roccia (Tabella 4).

SPECIE	INDIVIDUI				Totale Specie
	Morti	%	Vivi	%	
<i>Pinus sylvestris</i>	43	49,4	44	50,6	87
<i>Picea abies</i>	3	7	40	93	43
<i>Sorbus aucuparia</i>	0	-	4	100	4
Sconosciuto	85	100	0	-	85
<i>Totale Individui</i>	131	59,82	88	40,18	219

Tabella 4: censimento delle condizioni della copertura forestale al momento del rilievo.

5.2.2. RISPOSTA ALL'EVENTO DI ROCKFALL: ANDAMENTO DELLE LESIONI E TASSO DI MORTALITÀ

Sulla base del censimento dei danni provocati dal crollo dei massi sulla vegetazione sono state indicate sei categorie di lesioni di gravità crescente (Tabella 5):

- 0: nessuna lesione apparente;
- 1: lesioni tollerabili (rottura della chioma, fessurazioni superficiali della corteccia);
- 2: lesioni gravi (scortecciatura giunta fino al cambio o di superficie molto estesa);
- 3: pianta cimata o destabilizzata per parziale sradicamento;
- 4: pianta stroncata ad altezza variabile;
- 5: pianta schiantata al suolo.

L'introduzione della categoria "0" ha un duplice significato: per molte piante morte è stato impossibile procedere alla verifica dei danni, in quanto si sono presentate in avanzato stato di disgregazione del legno e in assenza di cortecce utile alla rilevazione delle lesioni, mentre per la componente forestale viva con tale precisazione si è potuto stabilire a priori che alcuni individui non sono stati interessati dal crollo e, di fatto, la loro sopravvivenza è frutto della casualità, anziché opera di un'efficace resistenza meccanica.

Servendosi di questa classificazione è risultato che, sul totale di 131 individui deceduti, 49 (37,4%) non hanno manifestato alcuna lesione apparente (la mortalità potrebbe essere stata procurata indirettamente dal rockfall, per stress edafico o attacco parassitario). Per quanto concerne le piante vive illese, la percentuale è salita fino al valore di 55, su un totale di 88 elementi sopravvissuti.

A seconda di quanto emerso, l'evento di crollo si è certamente abbattuto sul 55,7% del popolamento, pari a 122 individui sul totale complessivo di 219 piante censite.

Approssimativamente è possibile affermare che ogni individuo aveva una probabilità di 1 su 2 di essere colpito da un masso.

	CATEGORIE DI GRAVITÀ DELLA LESIONE					
	0	1	2	3	4	5
PIANTE MORTE	49	19	24	6	17	16
PIANTE VIVE	48	8	23	5	4	0
TOTALE CAT.	97	27	47	11	21	16
% SUL TOTALE DEL CAMPIONE	44,29	12,33	21,46	5,02	9,59	7,31
TOTALE LESIONATI	122 (55,71%)					
% SUL TOTALE DELLE LESIONI	22,13	38,52	9,02	17,21	13,11	

Tabella 5: censimento per livelli di gravità delle lesioni alla vegetazione.

Nonostante le apparenze, il fenomeno di crollo si è rivelato meno dannoso del presunto, infatti la percentuale più alta di lesioni spetta alla categoria 2 con 47 individui colpiti (38,52% del totale di alberi lesionati) e a seguire, alla categoria 1 con 27 individui (22,13%) (Tabella 5).

Tra queste, a testimonianza della non eccessiva severità dell'evento vi sono 31 individui colpiti attualmente in stato vegetativo (comprensivi delle quattro latifoglie di sorbo).

I deperimenti dovuti a collisioni dall'esito fatale (perdita del cimale e rottura del tronco, parziale sradicamento con destabilizzazione della pianta e schianto completo) sono in totale 39, con valori di sopravvivenza ridotti al minimo (18,75%), ovviamente in decrescita all'aumentare della categoria di danno, alla quale corrispondevano minori probabilità di superare il trauma.

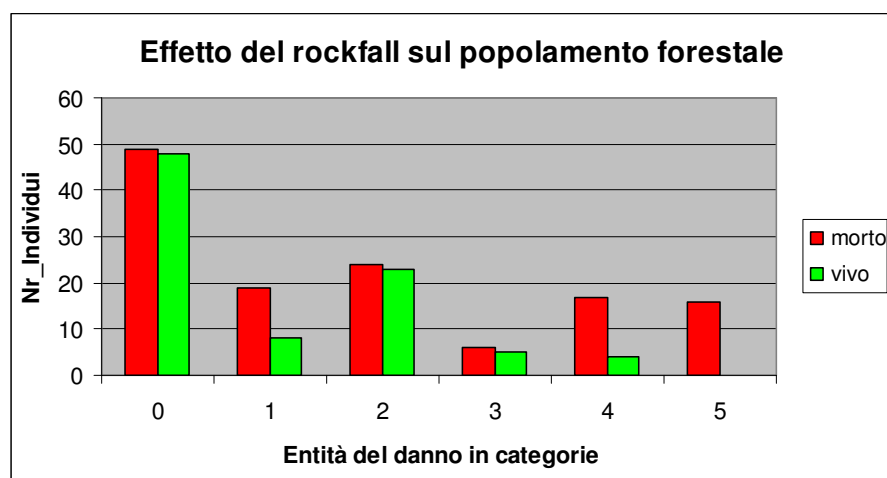


Figura 12: effetto delle entità dei danni sul popolamento.

5.2.3. CLASSIFICAZIONE DELLE LESIONI PER CLASSE DIAMETRICA

Al fine di migliorare la comprensione degli effetti causati dall'evento di rockfall, il popolamento forestale è stato omogeneizzato in sei classi diametriche:

Classe diametrica	Diametro (cm)	DBH medio (cm)
1	da 4 a 11	7,5
2	da 11,5 a 18	14,5
3	da 18,5 a 25	21,5
4	da 25,5 a 32	28,5
5	da 32,5 a 39	35,5
6	da 39,5 a 46	42,5

Tabella 6: organizzazione delle classi diametriche all'interno del popolamento

Una successiva analisi più dettagliata delle entità del danno ha rivelato che anche per ogni classe diametrica la frequenza più alta di lesioni appartiene appunto alla categoria di danno di livello 2, interessando il 28% del popolamento.

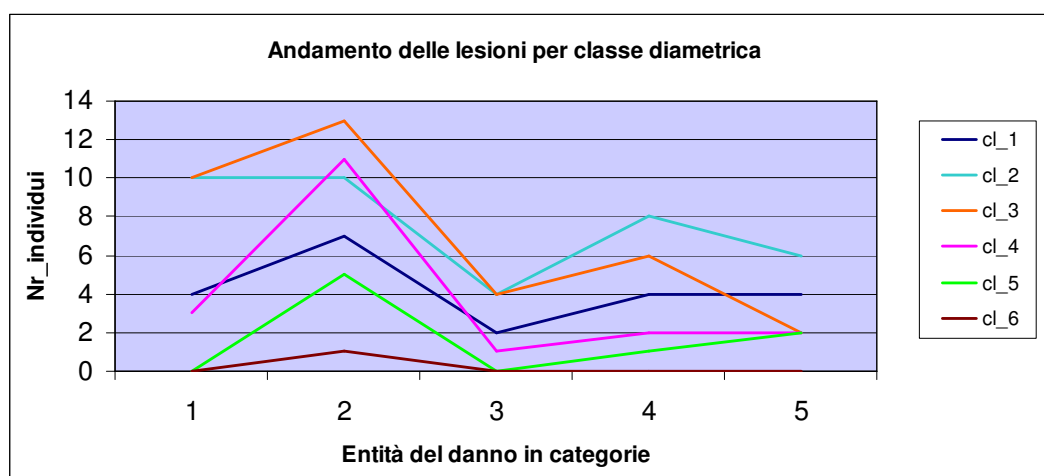


Figura 13: distribuzione dell'andamento delle lesioni per classe diametrica.

Come si può notare nel grafico di figura 13, alle classi diametriche 2 e 3 (rispettivamente 14,5 e 21,5 centimetri di diametro medio) appartengono i valori più alti; ciò è giustificabile dal maggior numero di individui compresi in suddette classi (il popolamento nell'area disturbata assume per l'appunto un diametro medio di 19 centimetri, con 72 individui per la classe diametrica 2 e 56 per la classe diametrica 3, sul totale di 219) e, oltre ad avere maggiore probabilità di essere interessati dal crollo di massi, per la ridotta dimensione dei tronchi possiedono minore capacità di tolleranza verso le ferite comportate dagli impatti (si veda il grafico di figura 14).

Nonostante ciò, è risultato che il maggior numero di soggetti deceduti rientra nella classe diametrica superiore di raggruppamento 4 (28,5 centimetri di DBH) con un tasso di mortalità del 73%; a seguire seguono la cl_3 con il 64% e la cl_2 con il 58% (grafico di figura 14). Quanto detto potrebbe trovare giustificazione nella composizione della classe, unicamente formata da *Pinus sylvestris* (come evidenziato nella tabella 2 il pino silvestre del sito ha mortalità pari al 49,4%, contro il 7% dell'abete rosso).

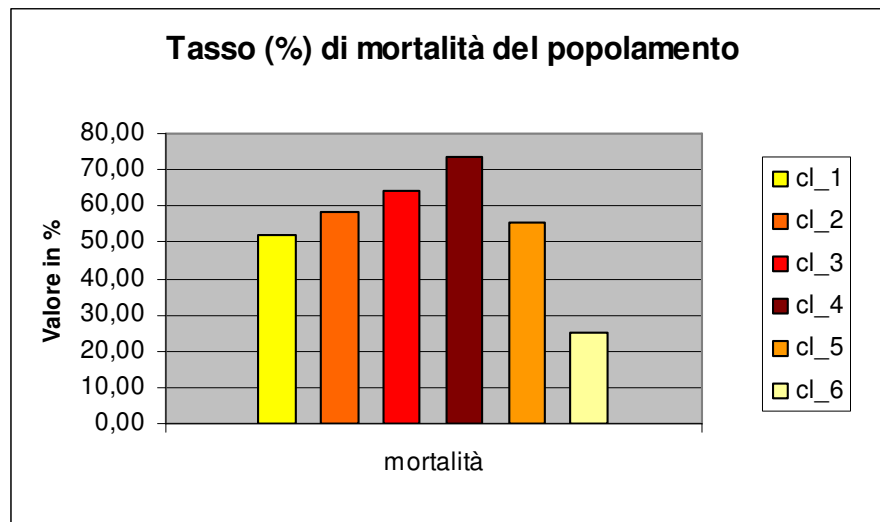


Figura 14: grafico delle percentuali dei decessi per ogni classe diametrica.

Nello specifico per ogni classe diametrica ogni categoria di danno ha prodotto diverse risposte in quanto alla mortalità degli individui (grafico di figura 15).

Lesioni di lieve entità, come quelle definite per la categoria 1, probabilmente dovute all'impatto con massi di dimensioni ridotte, hanno intaccato maggiormente le classi diametrica 1 e 2, mentre è plausibile che siano rimasti illesi per bassa frequenza di impatti gli individui della categoria 1. Al contrario, con l'aumento delle dimensioni dei tronchi sono stati coinvolti anche i soggetti di diametro superiore (classe 4).

Medesima situazione si è ripetuta nel caso delle ferite gravi (categoria 2) che hanno causato il decesso anche di piante della classe diametrica 5; in suddetta categoria è presente il maggior numero di lesioni afferenti alla classe diametrica 4. La presenza di soggetti di tali dimensioni potrebbe essere giustificabile dall'elevata sensibilità alle ferite del pino silvestre, veicolo di attacco parassitario e marciumi che difficilmente riesce a superare.

La minore mortalità rilevata per la categoria di danno 3 è motivata dall'assenza di elementi di classe diametrica 1 e 2, in quanto rotture del cimale e destabilizzazioni sono pressoché impossibili per soggetti di dimensioni ridotte, i quali in caso di impatto sono in grado di assorbire positivamente l'urto grazie all'elasticità del legno oppure vengono totalmente danneggiati dal masso (sradicati al principio e spezzati). Quanto detto trova riscontro nelle categorie di danno superiori, dove si inseriscono anche i diametri più piccoli delle piante.

Anche in queste categorie, a dominare con il picco di danno maggiore è la classe diametrica 2 ma si fa evidente che per volumetrie dei tronchi superiori ai 20 centimetri, il potenziale distruttivo dell'evento si riduce: nonostante la maggior probabilità di subire forti urti, le rocce liberate nel crollo non hanno sempre potenziale energetico tale da riuscire ad abbattere parzialmente o totalmente il popolamento di maggior diametro. Infatti, come si può vedere nei grafici di figura 14 e 15, nonostante il numero di individui ridotto per poter fare una stima accurata, la classe diametrica 6 con i DBH maggiori, presenta esclusivamente individui vivi.

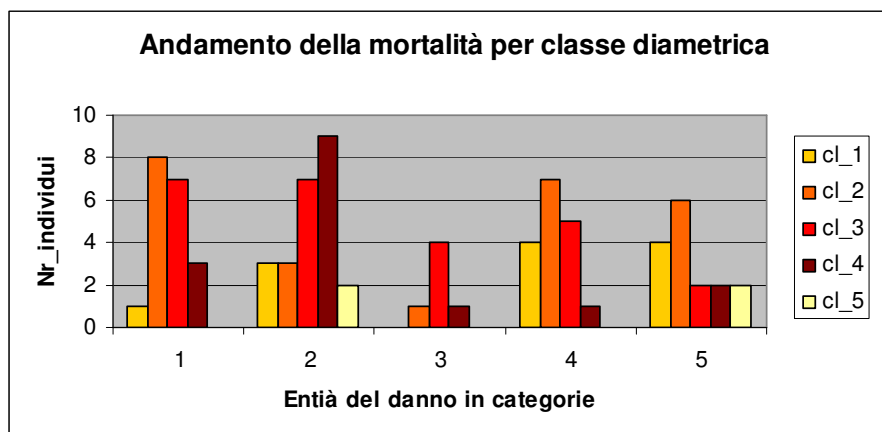


Figura 15: distribuzione della mortalità per categoria di danno in relazione alle classi diametriche.

Come atteso, il numero di sopravvissuti decresce fino ad annullarsi con l'incrementarsi della gravità dei danni (grafico di figura 16); risulta totalmente assente la categoria di soggetti vivi per entità di tipo 5, relativa agli schianti mentre si riduce al minimo la sopravvivenza nella quarta categoria. Molto più frequente è la tolleranza delle ferite, per quanto concerne le categoria di danno 1, 2 e 3. La maggior cadenza di danni afferenti alla categoria 2 ha conseguentemente coinvolto gran parte del popolamento in tutte le sue classi diametriche, medesima situazione ripetutasi per la categoria di danno 1.

Come messo in evidenza nel paragrafo relativo alla mortalità della categoria di danno 3, per quanto concerne la sopravvivenza, le classi di diametro inferiore assumono valori ben maggiori mentre gli individui caratterizzati da area basimetrica superiore tendono ad essere intolleranti verso suddette gravi lesioni.

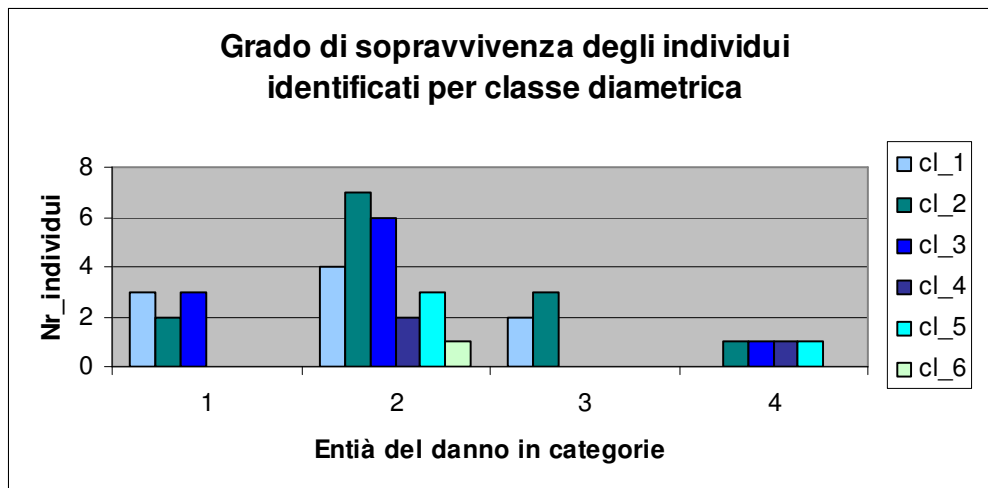


Figura 16: distribuzione degli elementi sopravvissuti per ogni classe diametrica in relazione all'entità di danno riscontrato.

5.2.4. POTENZIALE DEL DBH DELLE PIANTE SULLA DISSIPAZIONE ENERGETICA DEI MASSI

Come già menzionato, la quantificazione della massima energia dissipabile dal popolamento effettivamente colpito dall'evento di crollo, che manifestava lesioni o aveva bloccato la corsa di un masso, ha dimostrato che l'evento di rockfall è stato di elevata intensità e medio-bassa severità, anche in considerazione del danno limitato alle arboree del sito. Infatti, il grafico dell'andamento dell'energia di figura 17 ha evidenziato la sopravvivenza di tutti gli individui caratterizzati da DBH superiore a 20 centimetri.

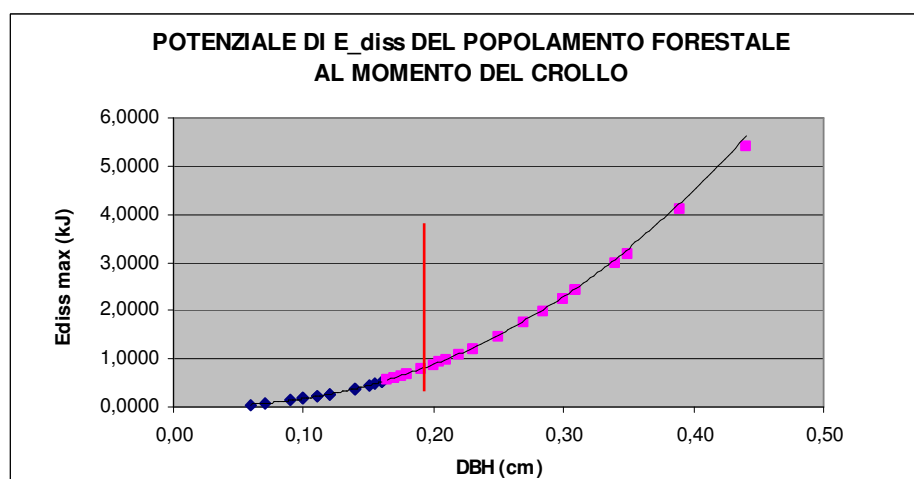


Figura 17: Valori di massima dissipazione dell'energia riguardanti il popolamento direttamente interessato dal crollo; evidenziati in blu i soggetti deperiti in seguito agli impatti con i massi.

La ricerca di una possibile relazioni tra il volume del masso e l'entità del danno subito dalla pianta è stata subito abbandonata, in quanto non è emersa alcuna associazione attendibile; in tabella 7 è possibile osservare che non vi sono legami tra ferita e dimensioni del blocco di roccia; ciò è dovuto in parte alla ristrettezza del campione censito ma soprattutto alla complessità del fenomeno e alla mancanza di dati utili, relativi alle velocità di caduta di ogni singolo blocco e alla sua posizione di partenza.

In linea di massima, al crescere della volumetria dei blocchi sono corrisposte ferite di gravità superiore, sebbene siano state riscontrate piante morte in seguito a lesioni di quarta categoria, causate da blocchi di diametro medio di 40 (tabella 7).



Figura 18: immagini di blocchi rocciosi rilevati sul sito

Caratteristiche del masso						Caratteristiche della pianta			
<i>Volume</i>	<i>d1</i>	<i>d2</i>	<i>d3</i>	<i>Peso roccia (kg)</i>	<i>entità</i>	<i>stato</i>	<i>dbh</i>	<i>area dbh</i>	<i>specie</i>
0,03	0,40	0,24	0,31	85	1	morto	0,09	0,02	n.n.
0,05	0,38	0,37	0,37	148	4	morto	0,14	0,08	Pinus sylvestris
0,07	0,48	0,32	0,43	188	4	vivo	0,29	0,02	Picea abies
0,07	0,55	0,34	0,37	197	0	vivo	0,31	0,08	Pinus sylvestris
0,08	0,64	0,26	0,48	228	1	morto	0,06	0,01	n.n.
0,08	0,69	0,27	0,43	228	1	vivo	0,23	0,01	Pinus sylvestris
0,10	0,61	0,33	0,52	298	1	morto	0,10	0,03	Pinus sylvestris
0,11	0,58	0,40	0,48	317	1	morto	0,07	0,02	Pinus sylvestris
0,12	0,71	0,38	0,46	354	2	vivo	0,25	0,01	Picea abies
0,18	0,82	0,35	0,61	499	0	morto	0,20	0,07	Pinus sylvestris
0,18	0,82	0,41	0,54	517	4	morto	0,12	0,02	n.n.
0,20	0,68	0,47	0,63	574	1	morto	0,10	0,06	Pinus sylvestris
0,28	0,78	0,54	0,67	804	2	vivo	0,23	0,00	Picea abies
0,29	1,00	0,51	0,57	828	4	vivo	0,31	0,06	Pinus sylvestris
0,31	1,20	0,38	0,68	884	4	morto	0,17	0,02	Pinus sylvestris
0,37	1,00	0,37	1,00	1055	0	morto	0,18	0,02	Pinus sylvestris
0,38	0,80	0,56	0,85	1085	2	vivo	0,30	0,02	Pinus sylvestris
0,40	1,00	0,49	0,81	1131	3	morto	0,11	0,02	n.n.
0,40	1,00	0,51	0,78	1134	0	vivo	0,22	0,00	Pinus sylvestris
0,43	1,00	0,50	0,85	1211	0	morto	0,17	0,02	Pinus sylvestris
0,49	1,00	0,69	0,71	1396	0	vivo	0,30	0,03	Picea abies
0,51	0,95	0,65	0,82	1443	0	morto	0,18	0,02	Pinus sylvestris
0,52	1,10	0,53	0,90	1495	2	morto	0,11	0,04	n.n.
0,57	1,30	0,55	0,80	1630	0	morto	0,18	0,03	n.n.
0,59	1,20	0,67	0,74	1696	5	morto	0,15	0,01	n.n.
0,72	1,30	0,50	1,10	2038	5	morto	0,16	0,02	n.n.
0,78	1,36	0,60	0,95	2209	2	vivo	0,35	0,10	Picea abies
0,86	1,39	0,55	1,13	2462	2	morto	0,10	0,04	Pinus sylvestris
1,03	1,50	0,57	1,20	2924	0	morto	0,21	0,07	n.n.
1,17	1,30	1,10	0,82	3342	2	vivo	0,34	0,09	Pinus sylvestris
1,57	1,74	0,82	1,10	4473	2	vivo	0,39	0,12	Pinus sylvestris
2,16	1,60	1,00	1,35	6156	0	morto	0,17	0,01	n.n.
2,16	1,60	1,00	1,35	6156	0	vivo	0,21	0,00	Picea abies
2,16	1,60	1,00	1,35	6156	0	vivo	0,27	0,01	Picea abies
2,50	1,75	1,10	1,30	7132	3	morto	0,14	0,03	n.n.
3,43	1,75	1,40	1,40	9776	5	morto	0,16	0,03	n.n.
3,60	2,00	1,50	1,20	10260	0	vivo	0,31	0,03	Pinus sylvestris
15,00	3,00	2,00	2,50	42750	3	morto	0,14	0,05	n.n.
15,00	3,00	2,00	2,50	42750	0	morto	0,19	0,04	n.n.
25,65	2,70	9,50	1,00	73103	2	vivo	0,44	0,15	Picea abies
30,00	5,00	4,00	1,50	85500	3	morto	0,12	0,08	Pinus sylvestris
30,00	5,00	4,00	1,50	85500	5	morto	0,16	0,06	Pinus sylvestris
30,00	5,00	4,00	1,50	85500	0	vivo	0,28	0,01	Sorbus aucuparia

Tabella 7: elenco degli individui arborei lesionati e rispettivo masso. Le piante non riconosciute al momento del censimento sono state individuate con la sigla "n.n."

A prescindere dall'entità del danno è emerso che la vegetazione con diametro superiore a 21 centimetri è sopravvissuta al crollo di roccia, sopportando collisioni anche con più elementi rocciosi, concatenati tra loro, per impatti complessivi di 25 metri cubi di volume.

1) Risposta delle piante (a dbh crescente) agli impatti contro massi di volume inferiore a una tonnellata:

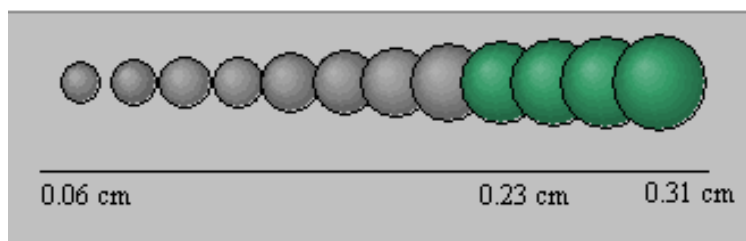


Figura 19: esito delle collisioni con massi di volume inferiore ad una tonnellata; in verde le piante attualmente vive.

2) Risposta delle piante (a dbh crescente) agli impatti contro massi di volume compreso tra 1 e 2 tonnellate:

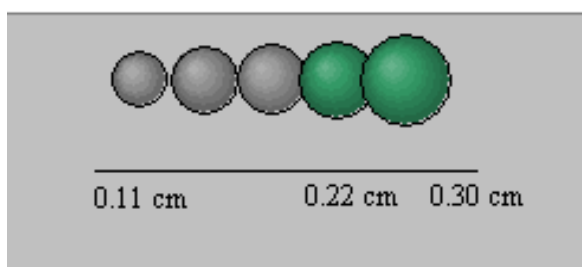


Figura 20: esito delle collisioni con massi di volume tra 1 e 2 tonnellate; in verde le piante attualmente vive.

3) Risposta delle piante (a dbh crescente) agli impatti contro massi di volume compreso tra 2 e 3 tonnellate:

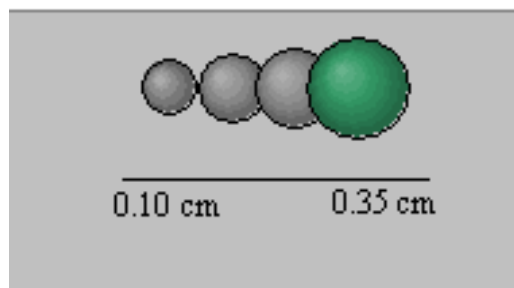


Figura 21: esito delle collisioni con massi di volume tra 2 e 3 tonnellate; in verde le piante attualmente vive.

4) Risposta delle piante (a dbh crescente) agli impatti contro masse di volume compreso tra 3 a 10 tonnellate:

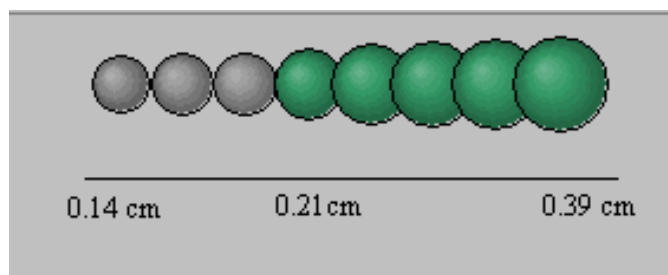


Figura 22: esito delle collisioni con masse di volume tra 3 a 10 tonnellate; in verde le piante attualmente vive.

5) Risposta delle piante (a dbh crescente) agli impatti contro masse di volume da 10 a oltre 50 tonnellate:

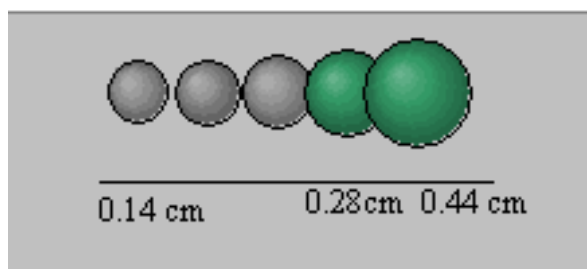


Figura 23: esito delle collisioni con masse di volume da 10 a oltre 50 tonnellate; in verde le piante attualmente vive.

5.3. SIMULAZIONI DEL ROCKFALL

Le prime simulazioni effettuate con il software Rockyfor3D e avviate allo scopo di verificare la correttezza dei dati di input hanno da subito evidenziato un problema con l'identificazione delle aree di crollo; nelle traiettorie di caduta ipotizzate sono state coinvolte molte più aree sorgenti di quante ne siano realmente presenti sul sito; l'inclusione errata di ulteriori fonti di detrito ha ricreato eventi di magnitudo superiore alla realtà e runout molto lunghe. La soluzione al problema è stata trovata mediante la definizione manuale delle aree sorgenti, attraverso un ritocco del raster *rockdensity.asc*.

Nello specifico, sono state escluse gran parte delle celle in grado di liberare detrito, distribuite su tutto il raster e conservate le sorgenti corrispondenti alla corona di distacco della frana, realmente visibile nella parete rocciosa a monte del sito esaminato, per un totale di 771 celle sorgenti (figura 24).



Figura 24: effettiva area sorgente del crollo di roccia (a sinistra) e corrispettiva zona individuata sul raster delle aree sorgenti (a destra).

Inizialmente le simulazioni di crollo sono state ripetute per le risoluzioni ad 1 metro, a 2 metri e a 5 metri, come viene consigliato per un corretto impiego di Rockyfor3D. In suddetto caso la risoluzione minima 1x1 metri è risultata essere la più accurata, data la ridotta estensione della superficie dell'area di studio e della buona qualità dell'ortofoto impiegata nelle simulazioni.

A differenza della risoluzione 1x1 metri, i rasters prodotti a scala maggiore si sono rivelati imprecisi e del tutto incompleti, rispetto alla situazione attualmente presente nella stazione esaminata.

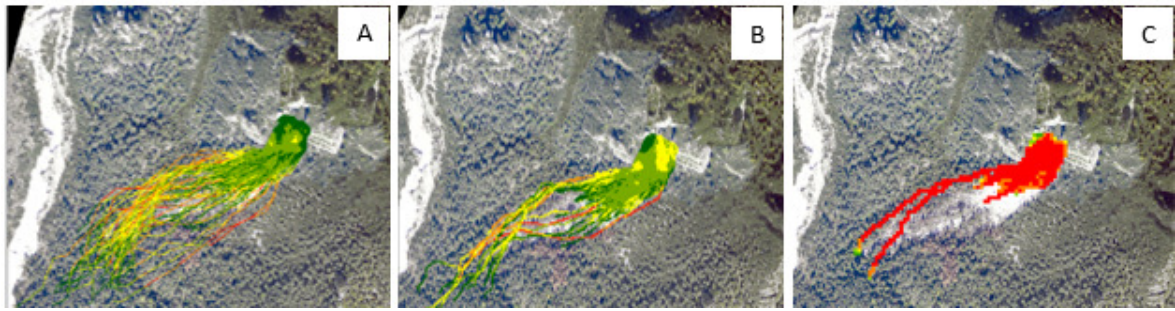


Figura 25: Raster finale risultato delle simulazioni di crollo. Confronto dell'energia media dell'evento prodotto a risoluzione a 1 metro (immagine A), a 2 metri (immagine B) e a 5 metri (immagine C).

Come si può vedere nelle immagini di figura 25, è evidente che le risoluzioni a 2 metri e 5 metri non presentano gli stessi aspetti dell'evoluzione dell'evento di crollo a risoluzione 1 metro; sono ben evidenti le differenti lunghezze di runout e l'estensione areale del fenomeno che si riduce all'aumentare della risoluzione. Ciò si ripercuote anche sulla diversa magnitudo finale stimata del crollo, molto più ridotta nelle risoluzioni 2x2 e 5x5.

Quanto detto trova giustificazione nell'ortofoto, la quale si presenta utile ai fini di un'analisi a scala locale ma non possiede un grado di dettaglio spaziale tale da sorreggere un esame di più ampio spettro, attraverso la funzione "Aggregate" di fusione delle singole celle per ottenere risoluzioni superiori.

Per ogni batteria di rockfall simulato sono stati analizzati e confrontati tra loro otto dei rasters di output forniti da Rockyfor3D; l'intensità dell'evento è stata commisurata considerando i livelli di energia cinetica media [kJ] prodotta dai massi in caduta, estratti dai valori massimali raccolti per singola cella (file *E_mean.asc*); l'estensione areale del crollo ed il suo sviluppo sono stati reinterpretati studiando le traiettorie, sia preferenziali che isolate, intraprese dai blocchi di roccia durante la discesa lungo il versante (file *Nr_passages.asc*); ipotizzando un moto parabolico uniformemente accelerato, il raster *Ph_mean.asc* (valore medio in metri delle massime altezze raggiunte per singola cella) ha fornito un quadro completo delle altezze da terra toccate in volo dai massi; tale parametro ha avuto però un'importanza minore in quanto non è stato possibile ottenere testimonianze reali in campo delle traiettorie dei rimbalzi, ad esclusione dell'area di bosco disturbato in cui sono state censite per ogni pianta danneggiata le posizioni delle lesioni dovute a collisioni con massi. Al contrario, considerevole attenzione è stata attribuita all'analisi delle velocità massime [m/s] raggiunte dai blocchi (file *V_max.asc*), uno tra i fattori principali in grado di quantificare la pericolosità del fenomeno, direttamente legato alla cessazione del moto dei massi e quindi alla dislocazione dei depositi, esaminata nel file *Nr_deposited.asc*. Quest'ultima mappa ha fornito inoltre informazioni sulle massime runout del rockfall ed è risultata la più sensibile alle variazioni di settaggio (altezza iniziale di crollo, variazione volumetrica dei massi e presenza/assenza di vegetazione) al momento dell'avvio delle simulazioni.

Nelle simulazioni di crollo in presenza di copertura forestale è stato inserito lo studio degli impatti tra massi e vegetazione al fine di determinare l'effettiva azione protettiva esplicata dal bosco. Parte dei risultati emersi nel raster *Nr_tree_impacts.asc* [num.] sono stati confrontati con la situazione reale del sito post-disturbo, sulla base dei rilievi di campagna orientati al censimento delle piante presumibilmente colpite da massi, poiché lesionate e poste in prossimità dei blocchi rocciosi arrestati.

Infine, attraverso l'interpretazione del raster *Reach_probability.asc*, prodotto come valore percentuale della probabilità che una determinata cella sia interessata dal passaggio di uno o più massi, è stato possibile determinare il vero peso dei parametri sopracitati ed individuare il più probabile sviluppo dell'evento di crollo, identificando le traiettorie di caduta preferenziali e i rispettivi parametri.

La comprensione dell'evento di rockfall attraverso l'analisi delle simulazioni prodotte è stata ripartita in tre azioni, aventi lo scopo di esaminare alcuni diversi aspetti del crollo di roccia, al fine di risalire alla più probabile forma di disturbo avvenuta lungo il versante del monte Antelao.

A tale scopo l'attenzione è stata indirizzata a tre differenti soluzioni, denominate in questo caso "scenari": il primo scenario ha riguardato l'effetto dell'applicazione di un decrescente numero di lanci a simulazioni prodotte in ambienti opposti, ossia in presenza di copertura forestale e su versante nudo; il secondo scenario è stato incentrato sulle eterogenee risposte di protezione offerte da una foresta in buono stato e una in condizioni di forte stress; l'ultimo scenario ha evidenziato infine l'evoluzione di rockfall in presenza di crescenti livelli di scabrezza, sia in presenza di vegetazione che in assenza di copertura forestale.

5.3.1. Scenario 1: Analisi dell'effetto della riduzione dei lanci nell'evento di rockfall.

I seguenti set di simulazioni tridimensionali sono stati lanciati allo scopo di esaminare la differenza indotta dall'utilizzo di un numero variabile di simulazioni per cella. In letteratura è risultato essere consigliabile adottare per gli eventi di crollo di roccia un numero di simulazioni pari a 100 lanci o addirittura superiore (fino a 500); in questo modo viene dato ampio spazio all'evoluzione spaziale del crollo; al contrario, in suddetto caso di studio l'attenzione è stata focalizzata sugli aspetti gravitativi predominanti nell'evento di rockfall.

A tale proposito sono state pensate tre semplici serie di simulazioni: ipotizzando che il valore di 100 lanci per cella fosse eccessivo per l'applicazione nel caso in questione, il parametro è stato progressivamente abbassato a 10 e a 1 numeri di lanci totali.

È stata portata a 20 metri l'altezza iniziale al momento del crollo e inserita una variazione volumetrica dei massi pari al $-/+50\%$.

Le stesse soluzioni sono state applicate sia in assenza di copertura forestale, ossia in una condizione priva di interferenze con altri elementi del versante, sia in considerazione dell'influenza del numero di lanci in presenza di vegetazione in condizioni di normalità (ante-disturbo).

A) Effetto della riduzione dei lanci applicati al medesimo ambiente: versante privo di soprassuolo.

1) Simulazione R01_senza foresta_100 Lanci.

<i>Descrizione</i>		<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>
Energia media	<i>kJ</i>	<i>E_mean.asc</i>	1.189	734,29	9.435,03
Massi arrestati	<i>n</i>	<i>Nr_deposited.asc</i>	5,22	83,55	77.100
Passaggi per cella	<i>n</i>	<i>Nr_passages.asc</i>	175,05	394,51	4.162
Altezza media del rimbalzo	<i>m</i>	<i>Ph_mean.asc</i>	1,81	1,40	33,87
Probabilità di passaggio del masso sulla cella	<i>%</i>	<i>Reach_probability.asc</i>	1,43	3,20	100
Volume del masso arrestato	<i>m³</i>	<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,41	0,49	3
Velocità massima	<i>m/s</i>	<i>V_max.asc</i>	26	8,33	69,44

Tabella 8: parametri di output della simulazione R01_senza foresta_100 lanci.

R01_senza foresta, a 100 lanci, rappresenta la simulazione di crollo su versante privo di soprassuolo, caratterizzato da scabrezza media compresa tra valori di MOH di $0\div 0.2$, equivalenti alla presenza di ostacoli che sporgono dal suolo non oltre i 10 centimetri di altezza, fino ad un massimo di 2 metri. Alla zona di crollo e al canale sono stati assegnati invece parametri superiori, in grado di rappresentare l'alta concentrazione di ghiaione e detrito roccioso.

La parete rocciosa sorgente di crollo è stata identificata con *soiltype* di tipo 6 (*bedrock*), mentre alla restante superficie del sito è stato attribuito il valore di 4 (suolo compatto, a tratti roccioso) e 1 per il canale (terreno caratterizzato da matrice incoerente, sedimento fine).

In tali condizioni l'evento prodotto attraverso la simulazione tridimensionale di Rockyfor3D è risultato essere di elevata intensità (oltre 9.000 kJ di energia); la superficie interessata dal crollo ha assunto dimensioni eccessive rispetto alle condizioni reali, sviluppandosi con runout che hanno oltrepassato in lunghezza la maschera predisposta in ambiente GIS per lo studio del sito, mentre la larghezza del crollo ha coperto oltre 400 metri planimetrici del pendio con numerose traiettorie di passaggio isolate.

Nel complesso, la distribuzione del crollo resta compatta, con andamento condizionato dalle massime pendenze, tendenzialmente spostato verso occidente. Ad est invece, si sviluppano molteplici traiettorie isolate dall'andamento anomalo.

Il fenomeno di crollo ha concentrato le sue massime energie a partire dal piede della parete rocciosa, con picchi localizzati in zona marginale (soprattutto lungo la fascia orientale); superata quella che nella realtà corrisponde alla zona di arresto, il crollo ha dimezzato la sua potenza, fino a raggiungere valori di 100 kJ, per poi riacquistare energia nelle runout e in zona est.

Alle forti energie sono corrisposte elevate velocità di caduta dei massi (figura 26, a sinistra) che sono arrivati a sfiorare i 70 m/s. Anche in coda all'evento i blocchi di roccia hanno mantenuto un'andatura sostenuta (20-40 m/s), intercettando nuovi scoscendimenti (20-30 m/s).

Nel file *Ph_mean.asc* energie e velocità hanno dato origine ad un moto parabolico dei massi caratterizzato da traiettorie generalmente di altezze inferiori ai 2 metri (circa il 70% delle altezze totali); in posizione centro-est del sito le altezze si spingono fino ai 6 metri dal terreno, probabilmente per la presenza del locale incremento delle pendenze. Parte delle runout visibili ad occidente terminano con altezze di rimbalzo comprese tra 2 e 10 metri.

Analizzando la distribuzione dei depositi emerge che semplicemente il 20% degli arresti totali ricopre l'intera superficie. Il 100% dei depositi è individuato ai piedi della parete rocciosa, nonostante la presenza di pendenze superiori ai 35°, con alcune elevate concentrazioni in zona alta di trasporto e verso la zona di arresto, in concomitanza di addolcimenti del versante.

I blocchi rocciosi vengono a dislocarsi lungo il versante senza un'apparente logica, dal momento che in zona di runout vengono a depositarsi sia i massi di piccole dimensioni che i blocchi più pesanti (figura 26, a destra).

L'altezza della parete rocciosa e il numero di urti non sembrano costituire un elemento rilevante nella frammentazione delle rocce, che al 70% mantengono volumetrie prossime ai 3 metri.

Anche in questo caso il settore di bassa pendenza (inferiore ai 35°) presente a metà del sito ha effetto sulla deposizione dei blocchi di minori diametri, a differenza dei massi di maggior volume che procedono a valle.

Il numero di lanci utilizzato per la simulazione ha prodotto un quantitativo di traiettorie superiore a 122.400 passaggi, concentrati alla base dell'innesco di crollo; la restante parte dei passaggi (20%) è costituita da una fascia che si estende fino alla zona di deposito con un numero di movimenti per cella compreso tra 83 e 1.040 percorsi (figura 26, a destra). Oltre questi settori la frequenza di passaggio scende a valori minimi, corrispondenti al 2% del totale (si fa notare che tale parametro rappresenta comunque un discreto livello di pericolo per l'incolumità della popolazione). A quest'ultima categoria appartengono le traiettorie di passaggio isolate presenti in zona est del sito.

Come atteso sulla base della dislocazione del numero di passaggi, il raster *Reach_probability.asc* evidenzia una concentrazione dell'evento di crollo limitata alla zona di innesco e alla zona alta di

trasporto, mentre la relazione tra il numero di massi simulati e il numero di passaggi indica una bassissima percentuale di blocchi (2%) che scendono lungo il resto del versante.

In tale scenario l'elevato numero di blocchi di roccia liberati dalla parete non permette di analizzare nel dettaglio l'andamento del crollo, in quanto le traiettorie seguite dai massi in caduta libera risultano sormontate tra di loro al punto da non riuscire ad individuare i percorsi preferenziali e l'effetto della morfologia del versante, se non in maniera generale.

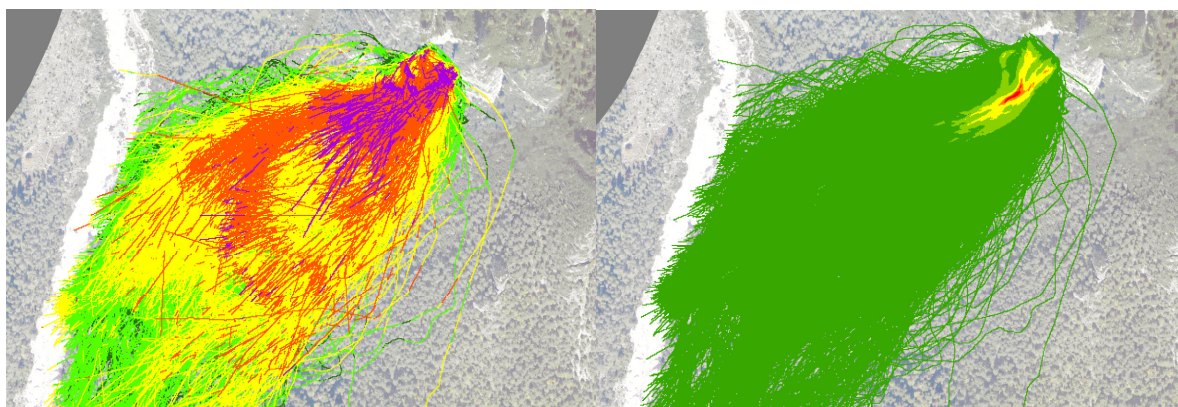


Figura 26: a sinistra, distribuzione delle velocità: inferiore a 10 m/s (verde scuro), 10 m/s (verde chiaro), 20 m/s (giallo), 30 m/s (arancione), 40 m/s (rosso), oltre 50 m/s (viola). A destra, raster Nr_passages: evidenziate in verde scuro le traiettorie percorse dal 20% dei massi; 50% dei passaggi (verde chiaro), 70% (giallo), 90% (rosso).

2) Simulazione R01_senza foresta_10 Lanci.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.350	782,36	9.698,51	kJ
<i>Nr_deposidet.asc</i>	1,68	1,43	7.710	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	23,75	46,79	436	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,71	1,70	44,00	m
<i>Reach_probability.asc</i>	10,74	4,84	100	%
<i>Rvol_depositt.asc</i>	2,16	0,51	3	m ³
<i>V_max</i>	24	9,91	69,44	m/s

Tabella 9: parametri di output della simulazione R01_senza foresta_10 lanci.

R01 a 10 lanci mantiene intatte le caratteristiche morfologiche del versante presentate per il set a 100 lanci. Unica differenza è la riduzione del numero di simulazioni abbassato a 10 lanci per cella. Con tale azione vi è l'intento di ridurre l'estensione areale del fenomeno per dare maggior peso all'effetto della gravità, che in primis influisce e determina il movimento dei singoli blocchi di roccia nei rockfalls.

La riduzione del numero di lanci ha prodotto un fenomeno di crollo di roccia di dimensioni ridotte rispetto alle simulazioni precedenti, sia per quanto concerne le lunghezze delle massime runout, sia per la larghezza totale della superficie interessata dal fenomeno di disturbo. La riduzione è di circa un quarto dell'estensione del crollo simulato a 100 lanci ed è individuabile soprattutto nella parte est del sito. La minor estensione areale del crollo è determinata dall'assenza di un considerevole numero di traiettorie isolate di caduta ai margini delle aree di trasporto.

Infatti, il numero di passaggi dei massi ha subito una diminuzione del 90%, mantenendosi pressoché invariato nella localizzazione sul versante: dall'area di trasporto alla zona di deposito le traiettorie assumono frequenze minime del 20% con il passaggio da 1 a 80 massi, mentre nella zona di crollo si concentrano il 70% e 90% dei percorsi intrapresi dai blocchi di roccia.

Avendo ridotto il numero di lanci la *reach probability* prende un diverso andamento: su gran parte della superficie disturbata la probabilità di passaggio dei massi assume valori da 2 a 20%, corrispondenti a situazioni di pericolo di livello medio, mentre nelle simulazioni a 100 lanci tale parametro restava confinato al 2% (rischio basso), superando il 20% solo ai piedi della parete rocciosa. Utilizzando un quantitativo inferiore di simulazioni aumenta la concentrazione di massi in zona di crollo, equivalenti ad una *reach probability* di oltre 70% (equiparabile ad un livello di pericolo elevato).

L'analisi del raster dell'energia media ha evidenziato una distribuzione dei valori molto simile alla situazione risultata dai 100 lanci, nonostante sia stato rilevato un aumento dell'intensità del fenomeno del 3%: le celle che presentano i maggiori picchi di energia (superiori a 1000 kJ) si trovano dislocate a partire dalla zona di innesco e interessano tutta la prima metà della zona di trasporto; in quest'ultima è ben visibile l'andamento delle traiettorie energetiche dei massi che tendono a scendere marginalmente rispetto all'asse centrale del sito, in corrispondenza delle aree del versante a minor pendenza.

Medesima situazione in prossimità dell'area a pendenza più morbida individuabile a circa metà del sito, dove le energie decrescono nuovamente per poi mantenersi elevate nella parte finale occidentale dell'evento di crollo con locali accrescimenti al momento della runout.

Come per la situazione a 100 lanci, anche con 10 simulazioni per cella le traiettorie marginali intraprese dai massi scesi ad oriente assumono i maggiori livelli di energia, con andamento tendenzialmente rettilineo.

Per quanto riguarda le energie dell'evento, la distribuzione spaziale degli intervalli energetici subisce una leggera riduzione, ossia per ogni traiettoria intrapresa dal singolo masso, il passaggio alla categoria energetica inferiore avviene più repentinamente ed il raggiungimento delle massime lunghezze di arresto si verifica in presenza di livelli di velocità minimi.

Oltrepassata la metà del sito le velocità si dimezzano.

Al calo di velocità superata la metà del sito corrisponde una maggior frequenza di altezze di rimbalzo di un metro, mentre vengono raggiunti di norma salti compresi tra i 2 e 4 metri dal suolo.

Si accrescono invece le parabole presenti ai lati dell'area disturbata, soprattutto nel margine occidentale dove si rilevano picchi massimi di oltre 40 metri di altezza, contro i 34 risultati dalle simulazioni a 100 lanci.

L'adozione di un valore ridotto di lanci ha avuto notevole effetto sui depositi caratterizzanti l'evento di crollo (figura 27): innanzitutto rispetto alla precedente simulazione i depositi diminuiscono di circa l'88%; mediamente per cella vengono a depositarsi da 1 a 4 blocchi di roccia, contro il range 1÷43 del set *R01_100 Lanci*. Solo la dislocazione dei massi risulta essere tale e quale alle precedenti simulazioni. Inoltre, è in questo scenario che si manifesta maggiormente l'azione del parametro della variazione percentuale dei volumi dei massi (posto a +/- 50%): difatti, la nuova distribuzione dei volumi evidenzia una ripartizione omogenea delle varie grandezze volumetriche dei blocchi (fino a 3 metri cubi), con una buona percentuale dei massi di maggiori dimensioni (figura 27).

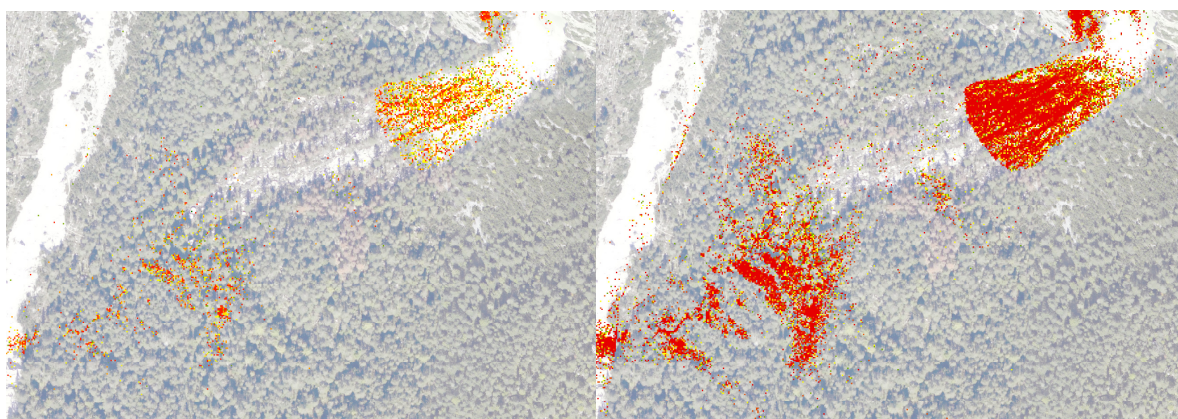


Figura 27: sviluppo dei depositi nel raster *Rvol.asc* per le simulazioni R01 senza copertura forestale a 10 lanci (a sinistra) e 100 lanci (a destra).

3) Simulazione R01_senza foresta_1 Lancio.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1,269	785,43	7,753,76	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,08	0,30	771	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	4,68	5,97	54	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,52	1,41	37,83	m
<i>Reach_probability.asc</i>	///	///		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,05	0,51	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	19	6,83	69,45	m/s

Tabella 10: parametri di output della simulazione R01_senza foresta_1 lancio.

La simulazione tridimensionale creata applicando un solo lancio per cella ha prodotto un evento di crollo di dimensioni ulteriormente ridotte: rispetto a R01_100 il disturbo interessa un mezzo della larghezza della superficie, mantenendo le massime lunghezze di runout evidenziate nella serie

R01_10: da quest'ultima si discosta per la mancanza dell'espansione laterale dell'area dissestata provocata dalla presenza di oltre una trentina di traiettorie laterali in R01_10.

Nel seguente scenario i percorsi marginali dei massi avviatisi a partire dalla sorgente di innesco ammontano a poco più di una decina di passaggi.

Nel complesso il rockfall simulato ad un lancio risulta essere il più realistico tra le tre ipotesi.

La scelta di introdurre un solo lancio ha permesso di rendere molto più evidente la direzione di caduta dei massi tendenzialmente traslata verso la zona occidentale del sito, all'intero di una depressione dove realmente sono stati rilevati in campo un elevato numero di massi depositati, indice del passaggio del crollo (figura 28).

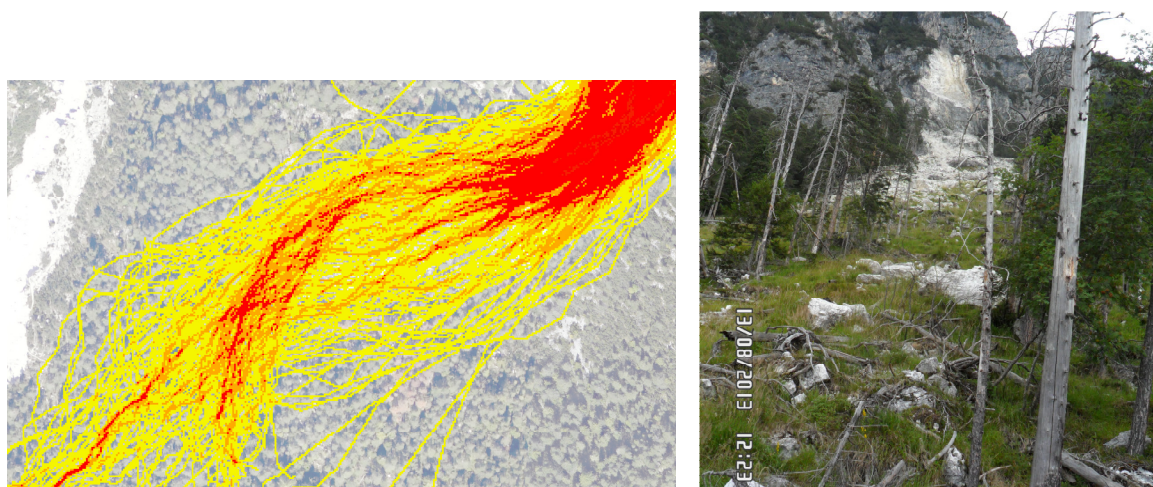


Figura 28: evoluzione del crollo simulato in R01 senza foresta a un lancio (a sinistra); evidenziate in rosso le aree di passaggio preferenziali, tendenti ad ovest superato la zona di crollo. A destra, confronto con la situazione reale del sito (margine ovest alla base della zona di crollo).

L'energia media dell'evento passa da valori di oltre 9.000 kJ a 7.700 kJ, con distribuzione dei valori simile ai casi descritti in precedenza; alle massime runout spettano le classi energetiche più basse, con picchi massimi di 500 kJ; la riduzione dell'intensità del crollo risulta quindi influenzata direttamente dal minor numero di lanci realizzati.

Il raster $V_{max.asc}$ evidenzia una diversa redistribuzione delle velocità massime, che mediamente non superano i 40 m/s; le più elevate restano confinate nella zona alta di trasporto, in presenza di pendenze superiori ai 35°. A differenza delle precedenti simulazioni, in tale situazione i massi raggiungono le velocità più basse ad appena 100 metri dalla parete, risentendo molto dell'addolcimento del versante di metà stazione. Mantengono un moto sostenuto solamente i massi appartenenti alle traiettorie incanalate ad ovest del sito.

Anche in suddetto caso è ipotizzabile un brusco arresto dei blocchi, in quanto le runout terminano generalmente con velocità di almeno 10 m/s.

A tali velocità ed energie corrispondono altezze medie di rimbalzo di 1,52 metri dal suolo (+16% rispetto alle simulazioni R01_100 e -11% per le simulazioni R01_10). Nella media il crollo non supera i 6 metri di altezza, ad esclusione di alcuni salti in prossimità della zona di innesco. Come

atteso, le traiettorie di rimbalzo più basse (sotto al metro) si manifestano in presenza di pendenze del versante inferiori ai 35°.

Dalla liberazione di un minor quantitativo di roccia si origina il 10% dei depositi rispetto a quelli prodotti nella simulazione R01_10; la dislocazione resta pressoché la stessa, con un'alta concentrazione di arresti in prossimità del piede della parete e in zona di deposito. Le uniche celle in cui sono previsti depositi massimi fino a 3 blocchi sono localizzate frontalmente alla sorgente di crollo, a circa metà lunghezza della superficie interessata dal crollo.

Nonostante le basse energie cinetiche, non sono evidenti depositi lungo il versante a minor pendenza posto al centro del sito; tale settore viene normalmente superato, con la liberazione di detrito a valle, in zona di arresto. Ciò potrebbe trovare giustificazione nel raster *Rvol_deposit.asc*, che evidenzia una distribuzione dei blocchi di maggior volume ai piedi del versante: sebbene questi massi siano caratterizzati da bassa energia, la loro maggior dimensione potrebbe favorirne la discesa a valle in opposizione alle forze di attrito applicate dalla struttura del suolo.

Al contrario, i litoidi dal diametro più contenuto si arrestano in testa alla zona di transito.

La ridotta disseminazione dei depositi potrebbe essere in parte determinata anche dal minor numero di passaggi di massi lungo il pendio: il 70% dei percorsi si trova entro i primi 90 metri dalla sorgente di innesco e corrisponde a 48 traiettorie, contro le 392 individuate per R01_10; rimangono invece invariate le superficie interessate dai passaggi attribuiti ad una frequenza del 20% ma anche in questo caso il valore passa da un massimo di 10 blocchi per R01_1 a 87 nel caso di R01_10.

Non è possibile effettuare osservazioni sulla *reach probability*, in quanto la relazione tra i lanci prodotti e il numero di passaggi distorce i risultati; emerge quindi che ogni cella dell'intera area sia rappresentata da una possibilità del 100% di essere varcata da un masso in caduta.

**B) Effetto della riduzione dei lanci applicati all'interno del medesimo ambiente:
versante con copertura forestale.**

4) Simulazione R01_foresta_100 Lanci.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.189	740,72	7.873,35	kJ
<i>Nr_deposidet.asc</i>	5,46	11,10	77.100	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	323,84	556,19	3.995	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,58	1,46	39,06	m
<i>Reach_probabilit.ascy</i>	1,68	3,63	100	%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,33	0,53	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	26	8,19	69,44	m/s
<i>Nr_tree_impact.asc</i>	93	224,46	3.954,00	Num

Tabella 11: parametri di output della simulazione R01_foresta_100 lanci.

Al fine di analizzare l'effetto del diverso numero dei lanci anche in presenza di copertura forestale, è stata presa come ipotesi una pineta comune tipica della zona, con densità pari a 300 piante ad ettaro, una percentuale di conifere del 90%, dbh medio di 36 centimetri.

Per questo set di simulazioni l'indice di scabrezza del suolo, per quanto riguardava la superficie vegetata, è stato innalzato allo scopo di rappresentare al meglio l'aumento di rugosità indotto dalle piante, dal legname che normalmente si deposita ai piedi dei tronchi nel corso del tempo e dall'humus prodotto nel sottosuolo.

Il tipo di suolo è stato identificato con il valore di 3, attribuito a terreni compatti, con presenza di detrito roccioso di piccolo calibro (al di sotto dei 10 centimetri di diametro).

In tali circostanze l'evento di crollo che si innesca interessa una superficie di oltre 430 metri planimetrici, estesi per circa 327 metri di lunghezza; probabilmente a causa della vegetazione incontrata nella discesa a valle, molti massi intraprendono traiettorie marginali isolate che occupano una superficie di 2/5 dell'area totale colpita dal rockfall. La maggior parte di questi percorsi anomali hanno origine a partire dalla zona di innesco e proseguono a valle in maniera caotica e zigzagante.

L'evento sviluppa 7.873 kJ di energia, con una media per cella di 1.188,54 kJ, distribuiti in tre classi energetiche: la prima, pari ad 1/3 della zona di trasporto inizia dalla base del crollo e si apre a "ventaglio" per 140 metri con valori di intensità elevati (2.000-5.000 kJ), ad esclusione delle due fasce marginali che raggiungono range di 1.000-2.000 kJ. Superato tale settore se ne apre un altro, sempre di 1/3 di lunghezza ma di maggior estensione laterale, dove i massi in discesa manifestano energie inferiori (1.000-2.000 kJ), con ulteriore decrescita in presenza degli incrementi di pendenza della zona est del sito (quanto detto non si verifica invece in zona ovest, presso i ripidi versanti di una depressione del sito). Suddette energie vengono mantenute fino ad arrivare alla distanza di un

centinaio di metri dalla zona di arresto; la dissipazione dell'energia avviene progressivamente; per quanto concerne le traiettorie isolate, le energie si mantengono molto alte e costanti per tutta la loro lunghezza; evidenti percorsi si diramano lungo il versante est e proseguono ben oltre la linea media di runout del rockfall.

Le velocità dei massi seguono l'andamento delle energie, con valori medi di 25,58 m/s. Zona di crollo e zona alta di trasporto vengono superate con picchi di oltre 40 m/s, per poi scemare in presenza dello scoscendimento ad est del sito, mentre lungo il canale di ovest i massi acquistano nuovamente in energia, favoriti dalla morfologia del versante.

L'ultimo tratto della zona di trasporto viene percorso a velocità entro i 20 m/s, fino all'azzeramento totale in zona di arresto. In tali circostanze i massi sviluppano salti parabolici in aria di 1,58 metri da terra di media, con picchi fino a 39,6 metri. Alla base della parete rocciosa si manifestano i rimbalzi maggiori, con elevazioni di oltre 6 metri da terra e una notevole frequenza di salti tra i 2 e 4 metri dal suolo. Questi ultimi riprendono poi al centro della zona di trasporto, sulle locali pendenze superiori ai 35°, mentre il resto dell'evento di crollo si contraddistingue per i balzi di 1-2 metri di altezza. Ai margini invece, in presenza di bassa energia e velocità minore, i massi si limitano a ridotte parabole sotto al metro di altezza (figura 30, in alto).

L'andamento dei depositi si sviluppa con concentrazioni da 1 a 41 elementi per cella in zona di crollo e superata la metà della zona di trasporto, con alta frequenza anche di celle di 104 massi; nella media l'evento distribuisce 5,46 blocchi di roccia per cella.

La distribuzione dei depositi avviene secondo un discreto livello di selezione granulometrica, che vede i blocchi di maggior volume giungere al piede del sito mentre i più leggeri (inferiori ai 2 metri cubi) si arrestano a partire da poche decine di metri dalla sorgente di crollo.

Il bosco non comporta notevoli effetti sulla frammentazione dei massi, che si mantengono mediamente sui 2,33 metri cubi, uno dei valori più alti rilevati, nonostante l'elevato numero di impatti masso-pianta (93,42 collisioni di media ed un totale di 3.954 scontri).

La maggior frequenza di urti si verifica all'interno del sito e decresce radialmente secondo una distribuzione a fasce in cui il numero di impatti cala allontanandosi dal centro del sito (figura 29).

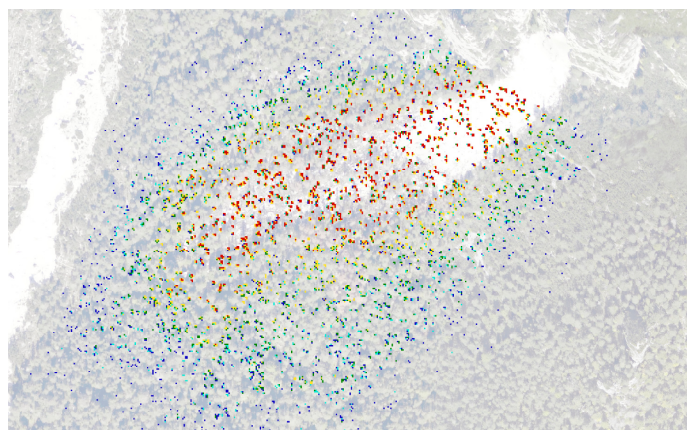


Figura 29: andamento della frequenza degli impatti masso-foresta; caratteristico sviluppo concentrico con numero di collisioni: 1 (blu); 3 (azzurro); 10 (verde); 100 (giallo); maggiore di 100 (rosso).

Nel complesso l'evento di rockfall risulta mediamente esteso, con una media di 323,84 passaggi per cella, ad esclusione delle numerose traiettorie isolate presenti al margine dell'area disturbata. Quanto detto è visibile nel raster *Nr_passages.asc*: il 10% del totale del numero di passaggi si distribuisce su quasi $\frac{3}{4}$ della superficie, mentre le frequenze di passaggio al 20% occupano meno di un quarto dell'area. In questa si distinguono inoltre celle interessate da frequenze di oltre il 50%, localizzate si alla base del crollo che lungo l'asse centrale della zona di trasporto; ciò dimostra la tendenza dei massi a procedere in maniera compatta ma omogenee lungo le celle del versante, senza prediligere una direzione in particolar modo.

Tale comportamento viene evidenziato dalla *reach probability*, dove le aree caratterizzate dal 10% dei passaggi di massi assumono valori di probabilità del 2% (associabili ad un rischio di livello basso), mentre quelle contraddistinte dal 50% rappresentano le zone di pericolo superiore, con valori 2-20%. Per il 70 e 100% della probabilità bisogna osservare le celle della zona di innesco.

5) Simulazione R01_foresta_10 Lanci.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.328	769,94	9.544,51	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,89	1,86	7.710	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	46,67	62,04	397	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,51	0,96	19,98	m
<i>Reach_probability.asc</i>	11,06	5,53	100	%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,17	0,52	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	24	9,75	69,44	m/s
<i>Nr_tree_impact.asc</i>	16	27,09	279,00	Num

Tabella 12: parametri di output della simulazione R01_foresta_10 lanci.

La simulazione di crollo in foresta prodotta a 10 lanci presenta le stesse differenze riscontrate nel passaggio da 100 a 10 lanci nello scenario ipotizzato in assenza di copertura forestale.

Si evidenziano lievi variazioni di espansione dell'evento: vengono a perdersi essenzialmente le traiettorie isolate ai margini dell'area disturbata e la zona di arresto arretra di una cinquantina di metri.

Nonostante la lieve riduzione di superficie disturbata, anche in questo caso il passaggio a 10 lanci produce un evento di intensità superiore (+18% rispetto al set *R01_foresta_100 Lanci*), innalzato da alcune traiettorie marginali di energia superiore a 5.000 kJ.

Le velocità mantengono la stessa distribuzione con decrescita radiale, ma ogni classe arretra di categoria, assumendo un range di valori inferiori, passando dalla velocità media totale a 100 lanci pari a 25,58 m/s ad una di 23,92 m/s (10 lanci). Anche in questa circostanza oltrepassata la metà del sito le velocità si dimezzano.

I depositi subiscono la stessa riduzione evidenziata nel passaggio da 100 a 10 lanci senza foresta, mantenendo le medesime localizzazioni, in questo caso con concentrazioni massime ai piedi del sito, dove vengono a disporsi i massi di maggior calibro.

Prevedibilmente, il numero di impatti passa da un totale di 3.954 a sole 279 collisioni che mantengono la dislocazione risultata nel set a 100 lanci; si arrestano però con lunghezze di runout leggermente più corte.

Come atteso, anche il numero di passaggi si riduce di circa il 90% mantenendo la stessa distribuzione in percentuale, influenzando anche i valori di *reach probability* (mediamente le celle della superficie sono caratterizzate da una probabilità del 20%, con aumento dei settori interessati da 20÷70% di probabilità di essere investiti dal crollo).

Le uniche differenze sono rappresentate dalla *Ph_mean* che anziché aumentare si riduce da 39 metri ad altezze più verosimili di 19 metri dal suolo (figura 30, al centro) ma aumenta la frequenza di rimbalzi compresi entro il metro di altezza in zona bassa di trasporto e ai margini dell'area interessata dal disturbo si manifestano molti più salti di altezza tra 2 e 4 metri, come risultato nel passaggio da 100 a 10 lanci senza foresta.

R01_foresta_10 Lanci non presenta la maggior sensibilità alla pendenza emersa nel set *R01_senza foresta_10 Lanci* rispetto al passaggio alle simulazioni a 100 lanci; stessa situazione nel caso della variazione percentuale di volume che in R01 con foresta a 10 lanci resta simile a quella emersa nelle simulazioni a 100 lanci.

6) Simulazione R01_foresta_1 Lancio.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1,492	849,74	8.882,19	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,16	0,51	771	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	6,91	6,86	45	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,58	1,38	31,46	m
<i>Reach_probabilit.ascy</i>	///	///		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,06	0,52	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	21	7,67	60,78	m/s
<i>Nr_tree_impac.asct</i>	3	3,74	45,00	Num

Tabella 13: parametri di output della simulazione R01_foresta_1 lancio.

La riduzione ad un solo lancio per cella manifesta risultati analoghi a quanto descritto nel medesimo passaggio per le simulazioni prive della copertura forestale.

L'evento di crollo si riduce sia in larghezza che in lunghezza, con una decrescita dell'intensità massima del fenomeno e un aumento delle energie medie rilevate per cella in correlazione alla minor superficie disturbata.

Il ridotto numero di lanci influisce sul numero di traiettorie percorse, con calo dei passaggi ad est del sito, permettendo di individuare meglio l'andamento evolutivo del crollo.

I passaggi mantengono la distribuzione percentuale rilevata per le simulazioni a 10 lanci, con riduzione del numero di elementi per classe.

Come atteso si rilevano riduzioni generali delle velocità, tranne lungo il margine est, e per la prima volta il valore massimo scende a 60,78 m/s contro il costante 69,44 m/s, che ha caratterizzato ogni set di simulazioni.

La riduzione del numero di depositi rispecchia quella verificatasi nel passaggio da 10 a un lancio in assenza di foresta, mantenendo la stessa distribuzione granulometrica (riduzione dello 0,05%).

Medesima circostanza per l'evoluzione degli impatti con la foresta, in linea con quanto avviene tra le simulazioni con foresta a 100 lanci e a 10, che decrescono in numero ma mantengono i range massimi in centro all'area disturbata.

Le differenze tra le due tipologie di simulazioni a diverso numero di lanci riguardano le energie, che restano costanti ed elevate (superiori a 1.000 kJ) per circa $\frac{3}{4}$ del sito per il set ad un solo lancio.

Altra incongruenza emerge nell'analisi della *Ph_mean* dove i salti fino ad un metro da terra assumono una maggior frequenza, distribuendosi omogeneamente a partire dal piede dell'area di crollo fino a raggiungere la metà del sito.

Una notevole riduzione delle altezze di rimbalzo si rileva nell'area di innesco ma nonostante ciò, il fenomeno si caratterizza per parabole in aria di altezza superiore rispetto alla precedente simulazione (*ROI_foresta_10 Lanci*), con valore medio di 1,58 metri (+4,5%) e picco massimo a 31,46 metri (+36,5%), (figura 28).

Impossibile effettuare riscontri in merito alla *Reach probability*, nulla per le simulazioni a un lancio.

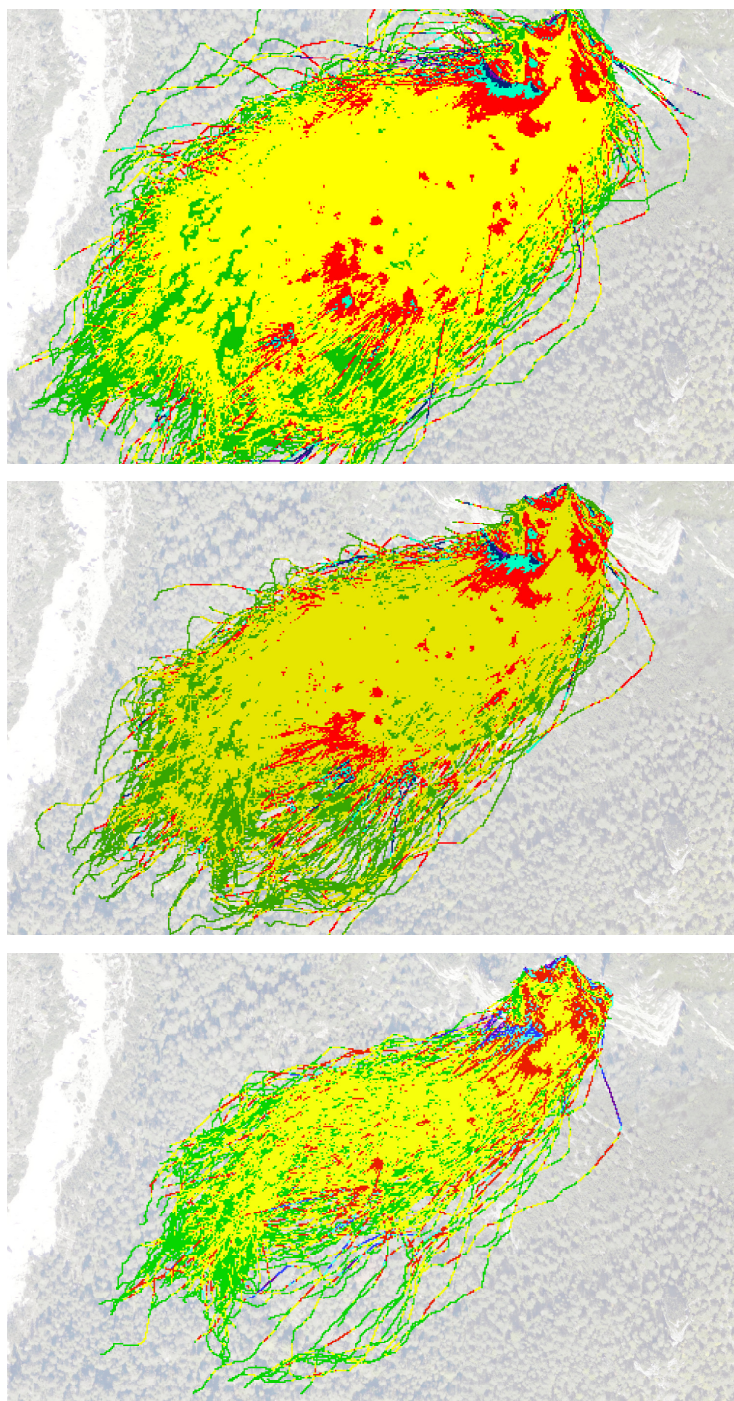


Figura 30: evoluzione delle altezze di rimbalzo dei massi in caduta nelle simulazioni R01 con foresta, prodotte a 100 lanci (sopra), a 10 lanci (al centro) e ad un lancio (in basso); Ph_{mean} : fino a 1 metro (verde); 1-2 metri (giallo); 2-4 metri (rosso); 4-6 metri (azzurro); 6-10 metri (blu); oltre 10 (viola).

C) Differenze emerse dalla riduzione dei lanci in ambienti opposti.

Durante l'analisi del prodotto delle simulazioni sono emerse sostanziali differenze nella risposta dell'evento di crollo alla riduzione del numero di lanci applicato in circostanze estreme. A tale proposito è stato predisposto un capitolo volto allo studio dei due comportamenti riscontrati.

Confronto tra le simulazioni *R01_senza foresta* e *R01_foresta normale* a 100 lanci.

L'introduzione della foresta nelle simulazioni ha prodotto una notevole riduzione della distribuzione spaziale del disturbo; in questo caso la foresta ha causato soprattutto un dimezzamento delle lunghezze delle runout, mantenendo quasi invariata l'estensione laterale della superficie di rockfall. Rispetto alle simulazioni senza foresta il fenomeno è rimasto molto più compatto nel suo sviluppo ma non sono state perse le traiettorie marginali isolate, in particolar modo quelle nell'area di crollo occidentale, mentre le massime runout di oriente sono diminuite nel numero ma ne sono rimaste sostanzialmente invariate le lunghezze.

Evidente cambiamento apportato dall'introduzione del bosco nelle simulazioni si è verificato nella distribuzione delle energie: rispetto al set *R01_senza foresta* l'intensità del crollo ha subito un calo pari al 16,5%, paragonabile all'energia totale risultata nelle simulazioni senza foresta ad un solo lancio. Inoltre, in presenza della foresta non è più visibile il picco massimo di energia distinguibile ai lati dell'area di trasporto; è invece evidente una distribuzione delle energie suddivisa in tre categorie: la prima ha origine a partire dalla base della parete rocciosa dove si manifestano da subito intense energie che aprono a ventaglio lungo il versante; la seconda, superati i primi 170 metri planimetrici in cui l'energia decresce fino a raggiungere i 1.000 kJ per cella e l'ultima contraddistinta dalle energie più basse (sotto i 500 kJ). Come già segnalato, il settore a sud-est del crollo presenta un forte incremento delle energie che prosegue fino al raggiungimento dell'area di arresto.

La velocità non sembra risentire dell'effetto della foresta rispetto allo scenario ipotizzato in assenza di soprassuolo (il valore massimo rimane a quota 69,44 m/s) ma rispetto alle precedenti simulazioni le distribuzioni delle classi di velocità ricoprono quelle a ventaglio individuate per l'energia media, con incrementi in presenza dei locali aumenti di pendenza del versante.

Mediamente fino a velocità di 30 m/s le simulazioni *R01 senza foresta* rispecchiano la situazione in *R01 con foresta*; superato tale valore le differenze sono invece notevoli: in assenza di foresta le velocità proseguono a valori costanti compresi tra 20 e 30 m/s mentre in presenza di copertura forestale i massi decelerano e si arrestano entro poche decine di metri, senza subire gli incrementi di energia rilevati per molte runout nei set di simulazioni precedentemente descritte. Ciò fa ipotizzare che con l'avanzare nel bosco il masso subisca una costante ed efficace dissipazione energetica in seguito alla rugosità del suolo e agli impatti con i tronchi e le radici.

L'esistenza di alte velocità sembra giustificare il livello di Ph_{mean} massimo pari a 39.06 metri (+13,3% rispetto alle altezze misurate in *ROI_senza foresta*), al contrario dei rimbalzi medi che risultano di poco inferiori, stimati intorno a 1,58 metri da terra.

La presenza di una copertura forestale sembra aver indotto una riduzione delle parabole in aria di altezza compresa tra 4 e 6 metri, presenti in quantità minore rispetto alle simulazioni senza soprassuolo.

Di grande effetto è la distribuzione dei depositi, molto più sensibile alle riduzioni di acclività del pendio che all'intervento della vegetazione: il consistente numero di massi liberati nella simulazione produce una media di 93 impatti roccia-albero per cella, con quantitativi massimi localizzati al centro del sito, alla base della parete di crollo dove inizia il bosco, che decrescono radialmente all'aumentare della distanza della sorgente di innesco, fino al manifestarsi di un solo impatto ai margini dell'area disturbata.

Al contrario, la frequenza dei depositi resta pressoché invariata rispetto a *ROI_senza foresta_100*, con una media di arresti per cella compresi tra 1 e 41 depositi.

Unica discrepanza è nella distribuzione dei massi in zona di arresto, arretrata di un centinaio di metri e nella dislocazione lungo il versante che assume una forma molto più omogenea, con abbondanti concentrazioni superate il centro della zona di trasporto e bassissima affluenza alla base della parete rocciosa.

I massi sembrano non risentire degli urti causati dalla morfologia complessa del versante anche per quanto riguarda la frantumazione delle rocce in volumetrie minori, mantenendosi di volume elevato (sopra i 2 metri); come emerso nelle simulazioni senza copertura, anche in questo caso i blocchi di maggiori dimensioni si arrestano ai piedi della parete rocciosa, ma in quantitativo di molto inferiore, e soprattutto alla fine dell'area di trasporto ai piedi del sito.

La zona centrale dell'area di trasporto viene però interessata dall'arresto dei massi di dimensioni medie (2 metri di volume).

Per quanto concerne i passaggi, a parità di numero rispetto al set *ROI_senza foresta*, si manifesta una tendenza dell'evento di crollo a concentrarsi ed estendersi lungo l'asse centrale del sito, con il 20% delle traiettorie per oltre 300 metri planimetrici su 470 metri totali stimati; nella stessa area si rilevano inoltre picchi del 50% e del 70% dei passaggi, riconducibili a pericolosità di livello H4 (alto). Il resto della superficie si mantiene a livelli del 20%, (figura 31).

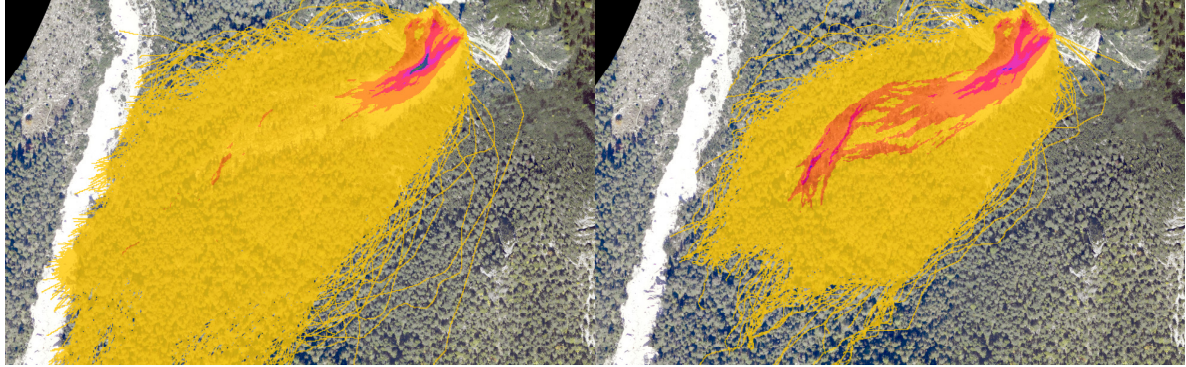


Figura 31: distribuzione del numero di passaggi per le simulazioni R01 senza foresta (a sinistra) e R01 con soprassuolo (a destra) prodotte a 100 lanci; evidenziati in giallo il 20% del totale dei passaggi; in arancione il 50%; in fucsia il 70%; in blu il 90% e in verde il 100%.

Sulla base del numero di passaggi rilevato per cella anche la Reach probability assume valori più estesi per quanto riguarda le celle interessate dal 20% del crollo di roccia, mentre i restanti valori non variano rispetto alle situazioni in assenza di bosco.

Confronto tra le simulazioni *R01_senza foresta* e *R01_foresta normale* a 10 lanci.

La presenza della foresta sembra non avere alcuna influenza sull'intensità del fenomeno che resta pressoché invariata (-1,6%); notevole differenza è evidente invece nell'evoluzione delle runout del crollo, che si riducono al piede di 80 metri in zona occidentale e di oltre 150 metri ad oriente, settore in cui si manifestavano le traiettorie a massime energie e lunghezze. Vengono perse anche le traiettorie di caduta isolate, generalmente presenti lungo il margine ovest del sito.

L'energia media per cella si riduce di 21,43 kJ rispetto alla situazione in assenza di copertura forestale; in quest'ultima la distribuzione delle classi energetiche mostrava una discreta sensibilità alle pendenze locali del versante, con picchi di energia presso il lato occidentale della superficie di rockfall, superata la metà della zona di trasporto e al margine orientale ma in presenza di foresta tali manifestazioni sono venute a perdersi.

Alla sorgente di crollo la distribuzione energetica rimane la stessa risultata in assenza di soprassuolo ma in presenza dei primi alberi si apre immediatamente una area a ventaglio caratterizzata da energie comprese tra 2.000 e 5.000 kJ di potenza, contro i 500-1.000 risultati in *R01_senza foresta_10 Lanci*.

Superata suddetta porzione di territorio le pendenze si addolciscono e anche le energie dei massi scemano a livelli di 1.000-2.000 kJ. Oltre questo limite le classi energetiche vengono a sovrapporsi con quelle a pari valore individuate nella situazione in assenza di copertura forestale.

L'effetto della foresta induce una riduzione delle velocità massime dei blocchi che restano confinate alla zona di crollo, mentre senza soprassuolo si sviluppavano fino a raggiungere la metà della zona di trasporto. Rispettando la distribuzione a ventaglio delle energie, anche le velocità decrescono

avanzando nella discesa e deviando ad occidente con tassi superiori ai 20 m/s. Ad est invece le velocità si mantengono intorno ai 10 m/s, ad esclusione dei locali incrementi di pendenza che producono innalzamenti compresi tra 20 e 30 m/s; nel complesso le velocità risultano molto più basse di quelle rilevate in assenza di foresta.

Come per il set *ROI_senza foresta_10 Lanci* anche questo scenario risulta essere molto sensibile ai dislivelli di pendenza per quanto concerne le altezze massime di rimbalzo; la vegetazione comporta però una diminuzione delle altezze di salto che si limitano a raggiungere i 19 metri, contro i 44 risultati in mancanza di soprassuolo.

Ai piedi della parete rocciosa non vi sono evidenti variazioni, al contrario della zona alta di trasporto dove l'altezza media si mantiene tra 1 e 2 metri da terra. In zona di margine i salti superiori ai 2 metri di altezza lasciano il posto a rimbalzi di un metro; ciò potrebbe aver contribuito alla diminuzione del valore di altezza media totale del crollo su foresta.

Mantenendo a 10 il numero di lanci il quantitativo di depositi presente sul versante non cambia ma varia la media di arresti per cella, che sale a 1,89 (+11,12%).

Il 70% dei massi arriva a depositarsi in zona di runout (molto più corta rispetto alla runout di *ROI_senza foresta_10 Lanci*), iniziando ad arrestarsi superata la metà del sito e presso gli incrementi di pendenza locali. Non vi sono depositi lungo la zona alta di arresto ma si incrementano gli arresti nella restante superficie.

Nonostante la presenza dei tronchi, nel suddetto caso gli urti sembrano non essere in grado di incrementare la frammentazione dei blocchi; nella media il volume medio delle rocce si porta a 2,17 metri, contro i 2,16 risultati dalle simulazioni su suolo nudo. Nel caso delle simulazioni a 100 lanci tale valore passava da 2,41 metri per la stazione priva di vegetazione e 2,31 per le simulazioni con copertura forestale. Quanto detto potrebbe trovare risposta nel minor numero di lanci che dovrebbe comportare anche una più bassa frequenza di impatti (per quanto concerne gli scontri dei massi con il soprassuolo forestale il numero passa da 3.954 per la simulazione a 100 lanci a soli 279 per il set a 10 lanci).

La presenza della foresta causa una deviazione delle traiettorie dei massi che tendono a defluire al centro dell'area interessata dal fenomeno di crollo; tale condizione comporta un aumento dei passaggi medi per cella (46,67, ossia +50.72% rispetto alla situazione senza foresta). Il crollo, a partire dalla zona di trasporto, per due terzi di superficie complessiva è interessato da un numero di traiettorie pari al 20% del totale dei passaggi, mentre la restante parte, corrispondente alla zona di innesco e alla sede delle prime collisioni al suolo, è costituita da un 50% dei percorsi intrapresi dai massi in caduta libera. Quest'ultima percentuale di passaggi non risulta nelle simulazioni senza foresta, in quanto il 70% delle rocce scende a valle attraversando la zona di transito alla base della parete sede del crollo, per poi intraprendere percorsi con tassi di frequenza del 20%.

Ulteriore differenza è visibile superata la metà del sito dove si rilevano passaggi con frequenza del 70%, indice di pericolosità elevata, nonostante la zona sia caratterizzata da basse energie e velocità. Ciò

potrebbe trovare risposta nell'azione di dissipazione dell'energia cinetica dei massi operata dalle piante. È, infatti, in questo settore che si individuano le più alte frequenze di impatti contro la vegetazione. Per quanto concerne la Reach probability la foresta non comporta alcuna differenza nella disposizione delle percentuali in relazione al numero di passaggi rispetto al quantitativo di lanci.

Confronto tra le simulazioni *R01_senza foresta* e *R01_foresta normale* a 1 lancio.

Il crollo in ambiente forestale presenta la medesima espansione in fatto di larghezza, con una maggior ripartizione delle traiettorie lungo la superficie del versante. L'evento assume quindi omogeneità superiore, impedendo di individuare le traiettorie preferenziali delle rocce in caduta. La foresta comporta, come già dimostrato, una riduzione notevole delle massime lunghezze di runout, con cessazione del movimento dei massi anticipata di 120 metri di media (l'esaurimento totale delle energie avviene in maniera molto più repentina).

A differenza di quanto avviene nella situazione ad un lancio senza foresta, solo metà della zona di trasporto viene interessata da elevata attività, con valori compresi tra 1.000 e 5.000 kJ di energia; oltrepassato suddetto confine le energie decrescono e si esauriscono completamente entro 130 metri. In prossimità della zona di crollo, probabilmente a causa dell'impedimento comportato dalla presenza delle piante, si dipanano una serie di traiettorie marginali isolate su entrambi i lati del fronte, caratterizzate da elevate energie, soprattutto nella zona est, dove i massi di suddetti anomali percorsi si spingono fino al piede del sito mantenendo un comportamento singolare rispetto alla media. Quanto emerso, in linea con le precedenti simulazioni, come già indicato, rispecchia verosimilmente la situazione reale della zona orientale del caso di studio.

Mentre nelle simulazioni senza copertura forestale le fasce laterali dell'area di crollo subiscono un incremento delle energie, con la presenza di vegetazione si manifesta la propensione a perdere molta più potenza.

Rispetto alla condizione priva di foresta, le velocità massime si sviluppano centralmente all'area di rockfall, abbandonando la tendenza a proiettarsi ad ovest del crollo: alla base della parete, per un centinaio di metri, si manifestano le dinamicità superiori con picchi frequenti di oltre 50 m/s; seguono decrementi regolari delle intensità, con velocità medie tra 20 e 30 m/s per quasi 150 metri di lunghezza; infine, le runout terminano dopo tratti di una settantina di metri oltrepassati a minori velocità (sotto i 20 m/s); tale ripartizione corrisponde rispettivamente a circa metà lunghezza del sito nel primo caso (infatti la velocità media per cella dell'intero evento di crollo è stimata a 21,26 m/s, contro i 18,65 m/s senza foresta), mentre la seconda metà del sito si divide simmetricamente tra le due classi di energia minore (figura 32).

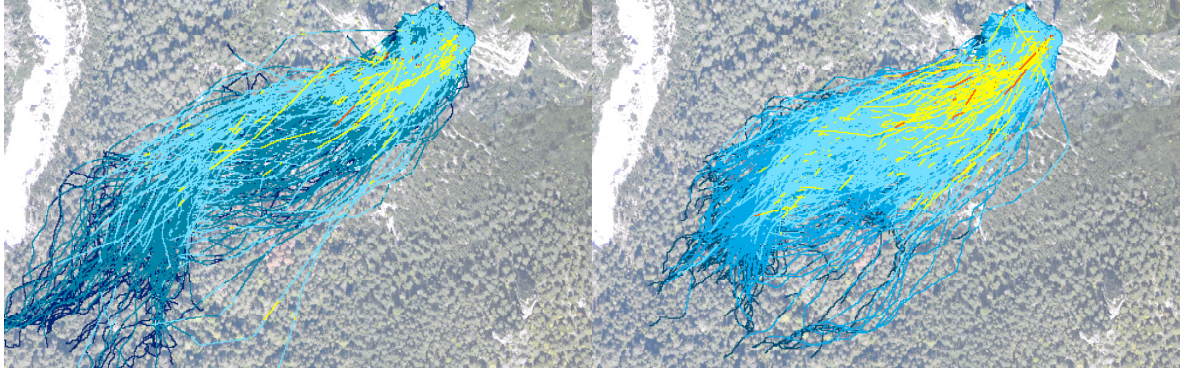


Figura 32: andamento delle velocità nelle simulazioni R01_senza foresta (a sinistra) e R01_foresta normale (a destra) ad un lancio. Velocità: oltre 50 m/s (rosso); 40 m/s (giallo); 30 m/s (azzurro); 20 m/s (celeste); inferiore a 10 m/s (blu).

Nonostante le maggiori energie e velocità medie per cella, si fa presente che questa è l'unica situazione in cui le massime velocità non raggiungono i 69,44 m/s (-12,5%).

In tali circostanze la *Ph_mean* massima si riduce a 31,46 metri da terra (-16,8%) ma aumenta leggermente l'altezza media dei rimbalzi (circa +4%); superata la zona di crollo, in prossimità dell'addolcimento delle pendenze (sotto i 35°) localizzato a circa metà stazione, il rockfall in foresta assume rimbalzi di altezza superiore (+12%) a quelle manifestate dal crollo di roccia su pendio nudo, portandosi a parabole in aria di 1-2 metri dal suolo. Medesima situazione si ripete in zona di arresto, sempre in presenza di un locale calo delle pendenze.

In linea con quanto emerso dall'analisi dei depositi nelle simulazioni con foresta, il quantitativo medio di depositi per cella rispetto alle situazioni prive di soprassuolo si accresce (in questo caso raggiunge circa +7%); a cambiare radicalmente è però la disposizione dei depositi: la superficie della zona alta di trasporto perde il grosso quantitativo di arresti verificatosi in assenza di copertura forestale, mentre aumenta il numero di depositi presso la bassa zona di transito, con celle che portano fino a 6 elementi rocciosi. Dei 771 arresti ipotizzati dal software, il 70% si dispone ai piedi del sito, con la crescita del numero di celle contrassegnate dalla presenza di oltre 2 massi.

Quanto detto influisce sulla composizione volumetrica dei blocchi: anche in zona di runout giungono alcuni dei massi di minor diametro nonostante le traiettorie maggiori appartengano ai blocchi di maggior volume; mano a mano che ci si allontana dalla sorgente di crollo si accrescono i volumi dei blocchi arrestati.

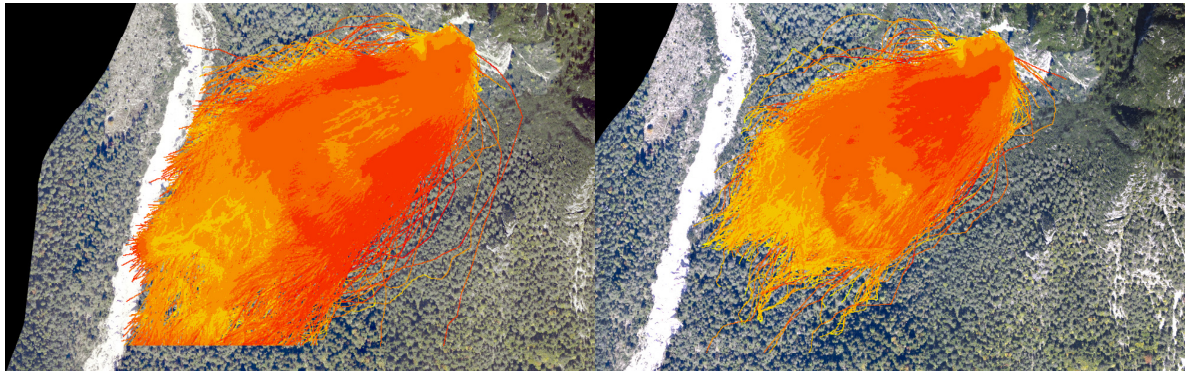
Anche in questo contesto il maggior numero di impatti contro la pineta si riscontra al centro dell'area di crollo ma ciò non comporta un aumento dei depositi che, al contrario, si concentrano ai piedi del sito.

Avendo a che fare con un fenomeno di crollo molto più concentrato, il numero di passaggi per cella si accresce lungo l'asse centrale del corpo di rockfall, sviluppandosi con il 50% dei transiti di massi prolungato per oltre il 90% della lunghezza totale della superficie disturbata, ricoprendo una fascia di una cinquantina di metri di larghezza, con incremento delle frequenze di passaggio del 50% e 70%.

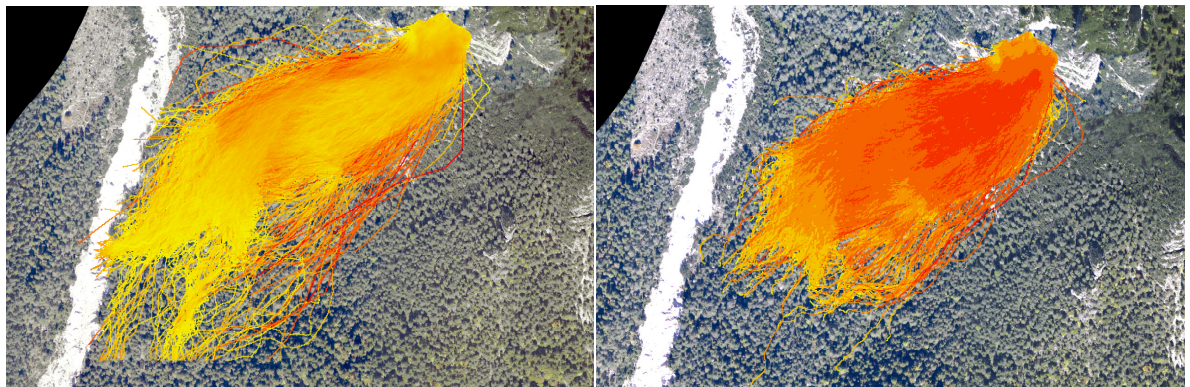
Simulazioni R01_suolo nudo

Simulazioni R01_foresta normale

Numero dei lanci: 100



Numero dei lanci: 10



Numero di lanci: 1

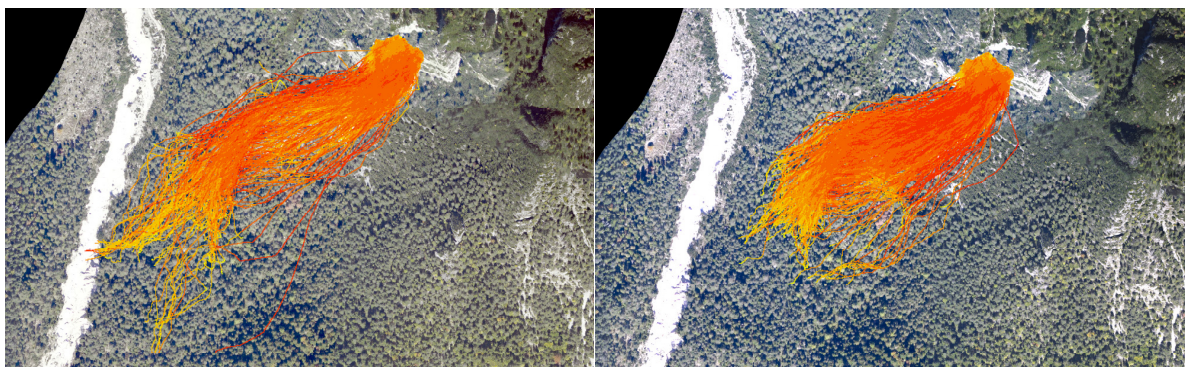


Figura 33: evoluzione del crollo di roccia per le simulazioni dello scenario 1

Le seguenti simulazioni sono state realizzate mantenendo a 10 il numero di lanci; dalle precedenti analisi tale valore è risultato essere il più attendibile nei confronti dell'evoluzione del crollo sul sito del caso di studio, in quanto il valore di 100 lanci per simulazione ha prodotto un surplus di liberazione di blocchi rocciosi lungo il versante mentre il valore di un lancio ha sottostimato il crollo, escludendo gran parte della superficie realmente colpita dal fenomeno di rockfall, e reso inattendibile l'analisi della *Reach probability*.

5.3.2. Scenario 2: Analisi dell'effetto della foresta contro l'evento di rockfall applicato in circostanze opposte (ante e post disturbo).

Confronto tra le simulazioni *R02_foresta normale* (7) e *R02_foresta disturbata* (8).

Il seguente capitolo ha lo scopo di evidenziare le differenze evolutive di un crollo di roccia verificatosi in due circostanze anteposte: il confronto è stato ipotizzato in ambiente forestale ideale, ossia in presenza di soprassuolo caratterizzato da parametri forestali ottimali, contro una simulazione prodotta in condizioni opposte, con bosco sottosviluppato.

Entrambe le simulazioni sono state realizzate rispettando le caratteristiche fitoclimatiche della fascia di appartenenza dell'area del caso di studio, al fine di realizzare un raffronto realistico e concreto tra due diversi casi di rockfall.

Per la prima ambientazione i parametri di input richiesti da Rockyfor3D hanno preso spunto dai dati medi censiti per le particelle forestali in buone condizioni presenti sul versante cadorino dell'Antelao: il bosco ha assunto quindi una densità forestale di 300 individui ad ettaro, di cui il 90% costituito da conifere, con dbh medio pari a 36 centimetri (deviazione standard 8,44).

Al bosco sono stati inoltre attribuiti valori di rg pari a 0,50-0,01-0,05 (rispettivamente 10, 20 e 70%).

In questo modo è stata così ricreata digitalmente un'imitazione attendibile della componente forestale del pendio, in stato antecedente al fenomeno di disturbo.

In contrapposizione, è stato predisposto uno scenario sulla base dell'attuale situazione del sito, con copertura forestale ridotta (158 individui ad ettaro) e dbh medio di 19 centimetri (deviazione standard 4,18), al fine di analizzare il crollo con copertura forestale ridotta e sotto stress.

I parametri in comune tra le due simulazioni riferiti all'indice di MOH del versante sono rimasti costanti, con valori di 0,5-0,01-0,01 per gli rg 10-20-70 della parete sorgente di innesco, 0,05-0,01-0,05 per gli rg 10-20-70 della zona di crollo e 100-100-100 per gli rg relativi al canale.

La simulazione prodotta per *R02_foresta normale* rispecchia quanto descritto per il set *R01_foresta_10 Lanci*; a tale proposito non verrà nuovamente ripresentata nel dettaglio, passando subito all'analisi delle differenze tra le due condizioni.

<i>R02 for dis</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev Std</i>	<i>Max</i>	<i>R02 for nor</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev Std</i>	<i>Max</i>
<i>E_mean</i>	1.279	796,45	10.377,97	<i>E_mean</i>	1.228	682,11	7.578,76
<i>Nr_deposited</i>	1,67	1,29	15	<i>Nr_deposited</i>	1,87	2,03	34
<i>Nr_passages</i>	26,56	48,21	360	<i>Nr_passages</i>	45,52	61,32	376
<i>Ph_mean</i>	1,63	1,54	43,70	<i>Ph_mean</i>	1,48	0,92	20,00
<i>Reach_prob</i>	10,86	5,27	100	<i>Reach_prob.</i>	11,05	5,37	100
<i>Rvol_deposit</i>	2,16	0,51	3	<i>Rvol_deposit</i>	2,17	0,52	3
<i>V_max</i>	22	9,48	69,44	<i>V_max</i>	24	9,67	69,44
<i>Nr_tree_imp</i>	5	7,83	165,00	<i>Nr_tree_imp</i>	15	25,39	315,00

Tabella 14: parametri di output delle simulazioni *R02_foresta disturbata* e *R02_foresta normale*.

La presenza di una porzione di soprassuolo in stato compromesso ha determinato una diversa evoluzione del fenomeno di crollo; innanzitutto il rockfall si è distribuito su di una superficie maggiore, conquistando terreno attraverso l'avvio di numerose traiettorie marginali isolate che hanno preso il via all'inizio del crollo, ai piedi della parete rocciosa (con concentrazione massima ad est del sito). La scarsità di ostacoli ha comportato inoltre un aumento delle runout di circa settanta metri.

Inoltre si manifesta la tendenza dei massi a scendere a valle presso il settore occidentale del sito, predisposizione rilevata analizzando le simulazioni su versante nudo *R01*.

Alla maggior superficie disturbata è corrisposta anche una maggior intensità dell'evento di crollo, con valori di energia totale pari a 10.377,97 kJ (+26,97% rispetto alla situazione in foresta normale). Nel complesso, per singola cella il crollo ha sviluppato 1.278,72 kJ di potenza, contro i 1.228,47 della simulazione opposta.

A differenza di quanto emerso nelle simulazioni con foresta, dove la distribuzione delle classi energetiche assume struttura "a ventaglio", la presenza di soprassuolo compromesso decreta una ripartizione meno uniforme delle energie, con sensibilità maggiore agli incrementi di pendenza del versante.

In zona di crollo le intensità superiori si spostano verso il margine occidentale della superficie, in corrispondenza dello scoscendimento presente nella stazione; lungo l'asse centrale dell'area di crollo, dopo appena 50 metri si verifica un notevole abbassamento delle energie, che passano dalla classe 2.000÷5.000 kJ a quella di 1.000÷2.000 (nella situazione con foresta normale il passaggio avveniva superati i primi 130 metri). Medesima condizione si ripete a circa 140 metri dal crollo, dove si evidenziano energie di 2.000÷5.000 kJ per la foresta normale e la decrescita fino 500÷1.000 kJ per la foresta disturbata. Quest'ultima area a minor intensità si espande secondo l'incremento delle pendenze presenti a sud-est del sito.

Nella restante superficie dell'area di trasporto le classi energetiche e le loro dislocazioni restano pressoché le medesime, con inizio dell'esaurimento dell'energia cinetica superati i 330 metri planimetrici dal piede della parete di crollo (intensità inferiore a 100 kJ).

Incrementi nelle energie si manifestano invece ai margini dell'area di crollo, in particolar modo ad est del sito, rappresentati da traiettorie isolate che si spingono ben oltre le massime runout risultate nelle simulazioni con foresta normale.

Le maggiori energie risultate dalle simulazioni con foresta compromessa potrebbero trovare spiegazione nelle capacità di dissipazione dell'energia operate dalle piante: nel caso della foresta normale i maggiori diametri potrebbero aver concorso ad un abbattimento superiore delle intensità del crollo; infatti, per l'adempimento di tale azione sono risultati sufficienti diametri superiori ai 20 centimetri, valore a cui non arrivano invece le conifere della foresta disturbata. Inoltre, la foresta compromessa ha una densità inferiore rispetto a quella di 300 individui ad ettaro del bosco normale. Per quanto concerne le velocità massime nella foresta compromessa i valori medi per cella decrescono del 4,38% (22,49 m/s), perdendo la distribuzione omogenea tipica delle simulazioni in foresta; a partire dalla zona di crollo, in presenza delle pendenze superiori a 35°, aumenta la frequenza dei massi che raggiungono le più alte velocità (superiori a 40 m/s), spingendosi in alcuni casi oltre la metà del sito, mentre le velocità comprese tra 30-40 m/s si esauriscono entro breve distanza. La zona di arresto viene attraversata mantenendo velocità inferiori (20-30 m/s), contro l'incremento degli intervalli a 30-40 m/s presenti in prossimità dei locali aumenti di pendenza (35°÷55°), sensibilità persa nelle simulazioni con foresta disturbata (figura 34).

Al contrario di quanto avviene nella situazione con foresta disturbata, la zona a sud-est del sito a maggior pendenza non presenta una decrescita delle velocità, bensì un incremento nel moto di discesa dei massi rocciosi (fino a 20 m/s di velocità), probabilmente a causa della minor resistenza opposta della vegetazione.

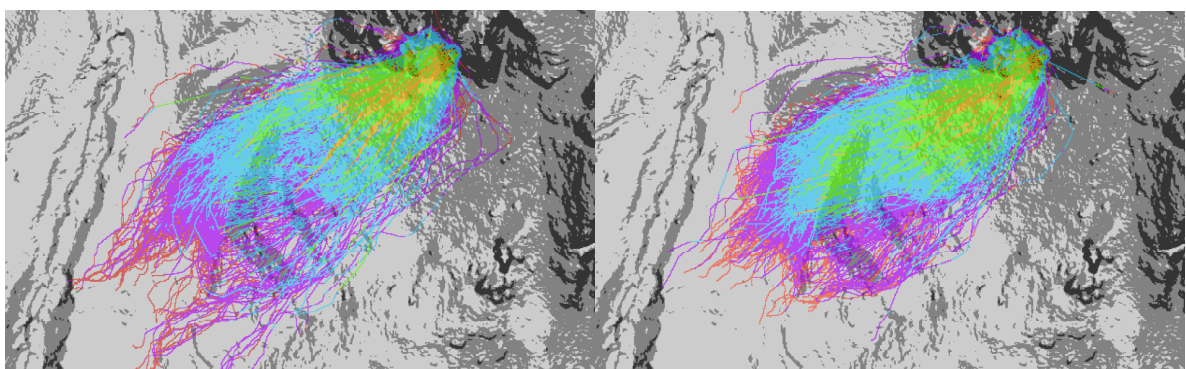


Figura 34: evoluzione dell'andamento delle velocità in relazione alla morfologia del versante nelle simulazioni R02 foresta disturbata (a sinistra) e R02 foresta normale (a destra). Velocità: oltre 50 m/s (arancione); 50 m/s (giallo); 40 m/s (verde); 30 m/s (azzurro); 20 m/s (viola); inferiore a 10 m/s (rosso).

La presenza di un buon strato forestale implica altezze di rimbalzo minori per il set R02_foresta normale, con valore massimo a 20 metri dal suolo e altezze medie di 1,48 metri; nel caso del bosco

disturbato invece le parabole in aria raggiungono mediamente 1,63 metri con valore massimo rilevato a 43,7 metri. In presenza dell'addolcimento delle pendenze (individuabile presso la testa dell'area di trasporto) i blocchi di roccia perdono velocità ed energia e, conseguentemente, ribalzano a valle con traiettorie più corte. È ipotizzabile che in suddetta zona, in seguito ai primi impatti con la foresta, vengano ad originarsi numerosi depositi di ramaglia, tonchi e rocce, di ostacolo al movimento regolare dei blocchi in corsa. Al contrario, con l'aumentare delle pendenze si manifestano invece un maggior numero di balzi in aria di notevole elevazione (superiore a 4 metri dal suolo).

La distribuzione dei depositi di *R02_foresta* normale rispecchia quella evidenziata nelle simulazioni *R01_foresta_100/10/1* Lanci, concentrandosi ai piedi del sito, con sporadici elementi dislocati anche lungo la zona alta di trasporto. In questa situazione i massi si arrestano con una media di 1,87 blocchi di roccia per cella, con picchi massimi a 34; in zona di arresto la frequenza maggiore di depositi si aggira intorno ai 6 blocchi per cella.

Nel caso del bosco compromesso la distribuzione è tipica delle zone prive di soprassuolo: gli arresti iniziano a partire dalla base del crollo, concentrandosi nella zona alta di trasporto con una media di un blocco di roccia per cella e fasce da 3 a 6 massi. Il restante 30% dei depositi viene disseminato nella restante parte di stazione, in prossimità di locali spianamenti.

Nella media, i massi si arrestano con una frequenza di 1,67 blocchi per cella (-10,7%), con un massimo di 15 elementi rilevati (-55,8%).

Tali valori indicano una tendenza superiore alla concentrazione dei depositi presso un'area di minor ampiezza, ossia quella situata entro i primi 140 metri dall'area di innesco.

Sempre in linea con i risultati emersi per le simulazioni con soprassuolo forestale anche per *R02_foresta normale* al crescere della distanza dalla zona di innesco si distribuiscono blocchi rocciosi di volumetria superiore.

Per quanto concerne il volume dei depositi, le simulazioni con foresta normale e disturbata non manifestano evidenti disuguaglianze: alla prima spetta un volume medio di 2,17 e alla seconda 2,16 (-0,47%); la diversità è ben evidente nella localizzazione dei depositi: per il set *R02_foresta disturbata* anche i massi di volume superiore si arrestano poco dopo la zona di crollo.

Alla maggior densità forestale che caratterizza il bosco normale corrisponde un valore medio di impatti per cella pari a 15,17, con picchi di 315; come atteso la distribuzione è concentrica, con la maggior frequenza di collisioni all'interno dell'area e decrescita verso i margini del sito.

La simulazione di rockfall contro bosco compromesso ha prodotto invece un numero di impatti inferiore, pari a 4,71 collisioni per cella e valori massimi di 165.

È lecito pensare che il numero sia basso non solo per la densità forestale dimezzata rispetto ai 300 individui della foresta normale ma anche per la minor probabilità di impatto posseduta dalla vegetazione, a causa del diametro ridotto.

Risulta invece poco comprensibile la dislocazione degli impatti in R02_foresta disturbata; inoltre, sembra non esservi corrispondenza tra la frequenza degli impatti e i livelli di velocità, di energia e/o il numero di passaggi.

Unico fattore in comune con le simulazioni con copertura forestale è la tendenza alla riduzione del numero di impatti in presenza di locali incrementi delle pendenze e ai margini dell'area interessata dal crollo.

Anche l'andamento del numero di passaggi si discosta dalla situazione con foresta normale per assomigliare alle simulazioni su suolo nudo.

Superata la zona di innesco uguale per entrambe le due simulazioni, le frequenze di passaggio rimangono pressoché costanti per una sessantina di metri; oltre questo limite in *R02_foresta normale* i massi incontrano il limite superiore del bosco e il numero di passaggi assume lo sviluppo individuato per le precedenti simulazioni con foresta. In *R02_foresta disturbata* si apre invece una sorta di radura, frutto delle azioni distruttive prodotte da antecedenti fenomeni di rockfall, caratterizzata dall'assenza di soprassuolo forestale: in tali circostanze il crollo perde l'effetto di "canalizzazione" verso il centro del sito operato dalla piante; i massi intraprendono quindi innumerevoli traiettorie di discesa a valle, con l'apertura di percorsi alternativi ai margini estremi dell'area di crollo. Il 90% della superficie investita dal rockfall viene attraversata da un numero di passaggi compreso tra 1 e 72, pari al 20% del numero di passaggi massimi rilevati per cella (figura 35).

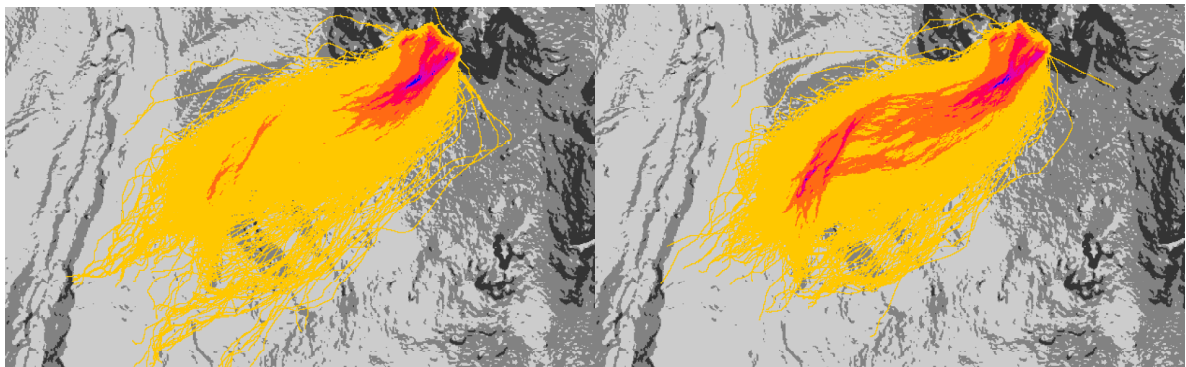


Figura 35: andamento del raster *Nr_passages.asc* nelle simulazioni R02 foresta disturbata (a sinistra) e R02 foresta ante-disturbo (a destra); evidenziati in giallo il 20% del totale dei passaggi; in arancione il 50%; il fucsia il 70%; il blu il 90%.

A tale distribuzione del numero di passaggi corrisponde una *reach probability* più dispersiva: entro i primi 140 metri dal piede della parete rocciosa la probabilità si mantiene nel range di 10-20% in entrambe le simulazioni; in *R02_foresta disturbata* le probabilità del 10-20% proseguono fino a alla zona di arresto rispettando l'andamento delle energie, ossia mantenendo una tendenza a svilupparsi presso il margine occidentale dell'area di crollo; è inoltre visibile un leggero effetto dell'azione "canalizzante" della foresta in prossimità del centro del sito, dove si manifestano settori di superficie caratterizzati da *Reach probability* del 20%, similmente a quanto avviene in *R02_foresta normale*.

Simulazione R02_foresta disturbata

Simulazione R02_foresta normale

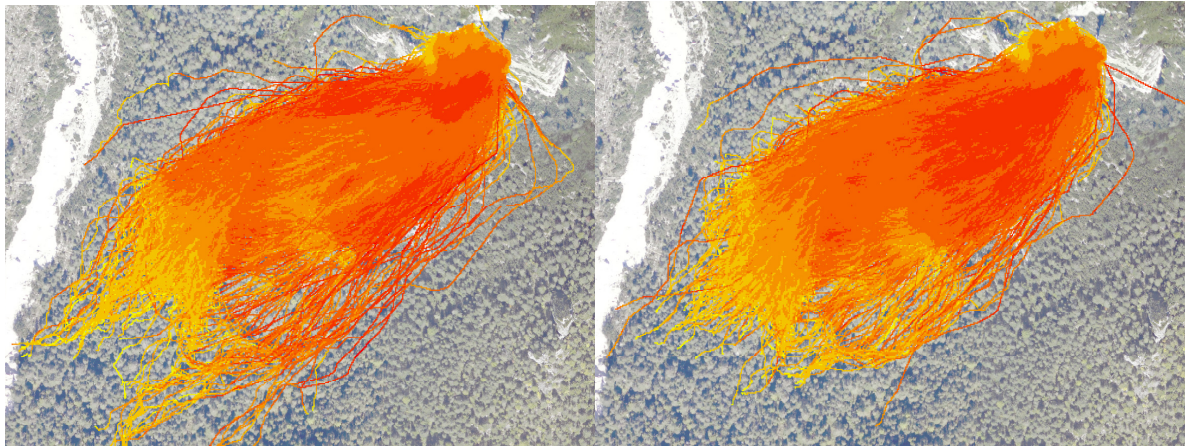


Figura 36: evoluzione del crollo di roccia nella simulazione R02.

5.3.3. Scenario 3: Analisi dell'effetto della scabrezza del suolo nell'evento di rockfall.

Tale capitolo ha lo scopo di evidenziare l'effetto della scabrezza del suolo nell'evoluzione di un crollo di roccia. Le simulazioni sono state prodotte con livelli di MOH crescenti, analizzandone l'effetto sia nel medesimo ambiente (foresta ante-disturbo) sia in circostanze completamente diverse (foresta post-disturbo).

A) Effetto dell'incremento dei parametri MOH nello stesso ambiente.

Per la simulazioni di partenza è stato ipotizzata una situazione di bosco medio, sempre nel rispetto dei parametri vegetazionali del versante di appartenenze del caso di studio. Sono riproposti i parametri individuati per la foresta ante-disturbo del set R02.

Al fine di evidenziare le differenze apportate dall'incremento dei valori di scabrezza del suolo sono stati utilizzati rg di livello crescente, a partire da una superficie caratterizzata da 0,5-0,01-0,05 (rispettivamente rg10-rg20-rg70).

9) Simulazioni R03_foresta normale: I livello di scabrezza.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.358,85	804,67	9.752,90	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,92	2,02	29,00	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	45,14	60,71	384,00	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,54	1,07	28,06	m
<i>Reach_probability.asc</i>	11,04	5,35		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,19	0,52	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	24,12	9,83	69,44	m/s
<i>Nr_tree_impact.asc</i>	15,55	26,49	354	Num

Tabella 15: parametri di output della simulazione R03_foresta normale_I livello di scabrezza del suolo.

Gli rg di base hanno ricreato un versante caratterizzato da una discreta rugosità del terreno: al 70% della superficie è stata assegnata una distribuzione di ostacoli di altezza $0 \div 0,10$ metri; per il 20% della restante area sono state previste altezze massime entro 0,10 metri dal suolo mentre al 10% degli ostacoli dislocati lungo il versante sono stati attribuiti innalzamenti dal suolo $0,10 \div 0,50$ metri. La simulazione R03 a valori di rugosità minimi rappresenta un evento di crollo di elevata energia (superiore a 9.000 kJ), con superficie disturbata compatta, incanalata dall'azione della foresta, ad esclusione dei margini caratterizzati dalla presenza di traiettorie isolate; la più lunga runout raggiunge 480 metri dalla sorgente di innesco, per un'estensione del fenomeno che si protrae a oltre 200 metri di larghezza.

Le energie si distribuiscono rispettando la struttura a ventaglio già descritta in precedenza: le più alte energie si localizzano in zona di crollo fino a raggiungere quasi la metà della zona di arresto; superato tale confine i massi dissipano parte della loro energia e procedono con potenza compresa tra 1.000-2.000 kJ per un centinaio di metri. Gli incrementi di pendenza presenti ad est del sito vengono superati con ulteriore decrescita delle forze (500-1.000 kJ).

Raggiunti i 100 kJ di energia i blocchi si arrestano entro poche decine di metri.

Anche in queste circostanze si manifestano una lunga serie di traiettorie al margine orientale dell'area di crollo, caratterizzate da elevate potenze.

Le velocità medie salgono a 24,12 m/s per cella: le massime si distribuiscono a raggiera a partire dal piede della parete rocciosa fino a coprire la metà superiore della zona di trasporto; la seconda metà dell'area di trasporto viene superata a velocità medie di 20 m/s, con incrementi di 30 m/s in presenza dei locali incrementi di pendenza (a ovest del sito).

In tali circostanze i valori di *Ph_mean* raggiungono i 28,06 metri da terra, con altezze medie dei rimbalzi pari a 1,54 metri, distribuite omogeneamente lungo tutta la zona di trasporto, ad esclusione dell'area di arresto dove si manifesta una maggior frequenza di salti entro il metro di altezza.

La buona composizione forestale comporta una dislocazione dei depositi concentrata in zona di arresto, con $1 \div 7$ elementi per cella. In totale i depositi ammontano a 1,92 blocchi per cella, con

valore massimo valutato a 29. La disposizione dei massi risulta particolarmente sensibile all'andamento morfologico del versante.

Il volume medio dei depositi è di 2,19 metri, con massi di maggior diametro concentrati in zona di arresto e blocchi più ridotti a partire dalla metà della zona di trasporto.

Anche in suddette circostanze risulta ben distinguibile lo sviluppo della sequenza degli impatti masso-foresta: il numero di collisioni decresce radialmente avvicinandosi ai margini dell'evento, dove la frequenza di impatti è minima mentre per tutta la lunghezza dell'area di crollo si verificano da 10 a oltre 300 urti.

Per quanto concerne il numero di passaggi, lungo l'asse centrale dell'area disturbata si concentrano il 50% delle traiettorie, con frequenze di oltre 70%.

Dall'analisi della *Reach probability*, superato il piede della parete sorgente di innesco con probabilità comprese tra il 20 e 70%, gran parte dell'evento si contraddistingue per la frequenza di movimenti pari al 20% (pericolo medio); le celle delle fasce marginali e quelle delle traiettorie isolate della zona ovest del sito assumono invece percentuali del 10%.

10) Simulazione R03_foresta normale: II livello di scabrezza.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.211,98	645,24	7.453,09	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,77	1,64	18,00	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	46,16	62,46	451,00	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,43	1,06	24,88	m
<i>Reach_probability.asc</i>	11,24	6,16		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,17	0,52	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	23,51	9,29	69,44	m/s
<i>Nr_tree_impact.asc</i>	15,92	26,62	356	Num

Tabella 16: parametri di output della simulazione R03_foresta normale_II livello di scabrezza del suolo.

L'aumento del grado di rugosità del versante viene conferito sostituendo i parametri di rg con i nuovi valori 1-0,05-0,05 per rg 10, rg20 e rg70. In questo modo le altezze attribuite agli ostacoli sono passate a valori compresi tra 0,5 e 1 metro per rg10 e da 0 a 0,10 metri per rg20.

Il primo effetto dell'aumento di scabrezza è la produzione di un fenomeno di rockfall di intensità minore (7.439 kJ di energia totale sviluppata, - 23,6%, con valori medi per cella di 1.212 kJ, - 10,8%); l'evento si presenta molto più compatto ma si estende su di una superficie di larghezza analoga a quella descritta nella situazione a scabrezza minima, in quanto vengono ad originarsi numerose traiettorie marginali isolate, dall'andamento particolarmente anomalo.

Lungo entrambi i margini dell'area disturbata sono ben visibili i percorsi di discesa dei massi, caratterizzati da traiettorie particolarmente sconnesse, che fuoriescono bruscamente per poi ricongiungersi al resto del corpo di frana.

La zona di arresto anticipa di una ventina di metri, mantenendo però parte delle runout più lunghe; la riduzione è ben visibile per quanto riguarda il versante orientale dell'area di crollo; diminuisce sensibilmente anche nella sua larghezza (-30% circa).

Al momento dell'innesco l'impatto a terra dei blocchi di roccia non subisce variazioni nei due set di simulazioni; la discesa si verifica invece con livelli di energia inferiori (1.000-2.000 kJ contro i 2.000-5.000 rilevati per le simulazioni *R03_I livello*); superata la metà del sito i massi manifestano una maggior sensibilità alla morfologia del versante, dissipando molta più energia in presenza degli addolcimenti di pendenza. Dopo circa 150 metri dalla sorgente (a metà area di trasporto) i blocchi presentano meno di $\frac{1}{4}$ della loro energia totale. Di notevole evidenza è la riduzione energetica delle traiettorie in zona est del sito, dove solo pochi massi sfiorano i 2.000 kJ di energia. Tale situazione rappresenta uno dei pochi casi analizzati in cui suddette traiettorie sottostanno ad un calo energetico. Alla minor intensità di rockfall corrispondono velocità ridotte che passano da una media per cella di 24,12 m/s a 23,51 (-2,53%); la presenza di considerevoli affioramenti comporta un rallentamento nella caduta dei massi, i quali oltrepassano la metà della zona di trasporto a velocità di 20 m/s. La cessazione del moto avviene in modo repentino ed in alcuni casi si verificano arresti improvvisi, senza esaurimento graduale delle velocità.

Dalle precedenti simulazioni è emerso che in presenza di maggior scabrezza la tendenza dei massi ad essere proiettati altrove decresce: coerentemente, anche *Ph_mean* si riduce del 7,15%, con un valore medio di 1,43 metri dal suolo ed un massimo raggiunto a 24,88 metri (contro 28,06 risultato per le simulazioni *R03_I livello*).

Il nuovo valore di MOH determina una riduzione dei rimbalzi di categoria maggiore, con un aumento della frequenza dei piccoli salti sotto il metro di altezza, sia in zona alta di trasporto che verso la zona di arresto (figura 37), mentre in *R03_I livello* gran parte della superficie di trasporto era occupata da parabole comprese tra 1 e 2 metri di altezza da terra.

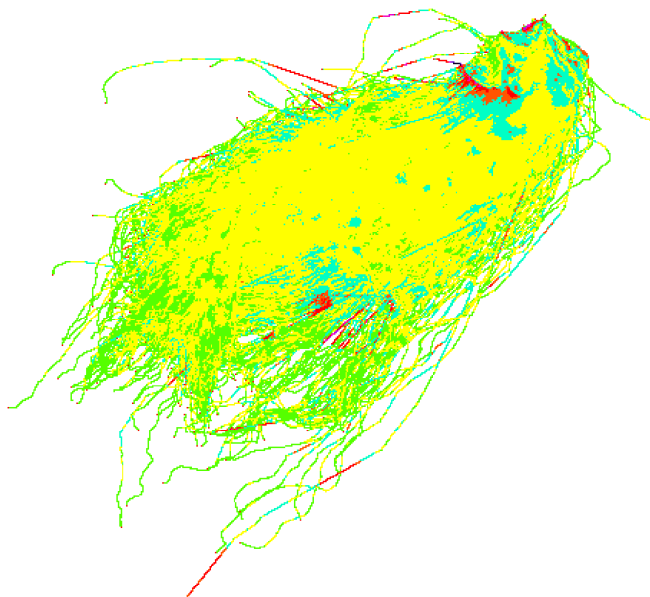


Figura 37: immagine tratta dal raster *Ph_mean.asc*; in giallo e verde i rimbalzi sotto al metro di altezza, in azzurro e rosso i salti di elevazione superiore a 4 metri.

Indirettamente, causando maggior dissipazione energetica e velocità minori, la scabrezza più alta favorisce la deposizione dei massi: la distribuzione dei blocchi lungo l'area è superiore, al punto da produrre una media di soli 1,77 massi per cella (-7,81% rispetto al precedente set), con maggior frequenza di arresti anche ai piedi del crollo e in zona alta di arresto.

A parità di lanci, il numero estremo di depositi rilevato sul sito scende a 18 (29 per la simulazione di I livello). In queste circostanze si manifesta una minor selezione granulometrica dei blocchi: tendenzialmente i massi di maggior dimensione riescono a raggiungere il piede del sito ma di questi una buona percentuale si distribuisce anche a partire da poche decine di metri dalla parete rocciosa. Molto più bassa la presenza di litoidi di minor calibro (1 metro) in zona di arresto.

Dall'analisi del raster *Rvol.asc* emerge una lieve differenza tra i volumi prodotti nelle simulazioni di I livello di scabrezza e quelli del II livello: la grandezza media rilevata assume, rispettivamente, il valore di 2,19 e 2,17 metri cubi. Lo scarto pari a 0,91% potrebbe trovare risposta nel maggior grado di frammentazione dei massi subito durante la discesa a valle su di un substrato più compromesso.

L'andamento delle collisioni contro il soprassuolo rispecchia quanto evidenziato nella precedente simulazione, al punto da assumere valori simili: 15,92 impatti per cella con picco massimo di 356 (contro 15,55 collisioni e 354 per le simulazioni di I livello). Si denota semplicemente un calo nel numero di celle contraddistinte da un quantitativo di impatti superiore a 100.

Rispetto alla situazione di base il fenomeno si contraddistingue per un numero medio di passaggi pari a 46,16 (+2,21%), con un picco di 451 (14,85%): avendo a che fare con una superficie disturbata di dimensione ridotta, è supponibile che i massi non abbiano assunto traiettorie preferenziali, imboccando un maggior numero di percorsi propagati su tutta la zona di trasporto.

Dalla *reach probability* emerge infatti che le fasce investite dal rockfall con probabilità fino al 20% occupano una porzione di territorio del 34,92%, contro il 39.06% della simulazione di I livello. Molto più estese sono invece le superfici caratterizzate probabilità superiore al 2%, indice di una minor propensione dell'evento a seguire una specifica traiettoria.

11) Simulazione R03_foresta normale: III livello di scabrezza.

<i>Raster</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.384,14	589,17	8.788,70	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,53	1,23	20,00	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	32,77	55,42	399,00	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,51	1,28	26,55	m
<i>Reach_probability.asc</i>	11,68	7,75		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,16	0,51	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	23,34	8,01	69,43	m/s
<i>Nr_tree_impact.asc</i>	9,57	19,63	252	Num

Tabella 17: parametri di output della simulazione R03_foresta normale_III livello di scabrezza del suolo.

I nuovi parametri di rg con valore 5,0-0,1-0,1 per rg 10, rg20 e rg70 hanno fornito altezze degli ostacoli pari a 2,5÷10 metri per il 10% della superficie e fino a 0,10 metri per le restanti frequenze a 20% e 70%.

Introducendo un ulteriore grado di rugosità al suolo l'evento di crollo ha assunto le sembianze dei rockfalls verificatisi in ambiente privo di copertura forestale, ossia con la tendenza ad originare un corpo di frana più sinuoso e proiettato verso ovest del sito.

L'evento ha interessato una superficie ancora più ristretta rispetto ai precedenti casi: la variazione ha riguardato in particolar modo la zona di arresto orientale, con cessazione del movimento di discesa a valle entro la metà del sito, ad esclusione di alcune traiettorie isolate anomale.

La restante area di runout è stata anticipata di una sessantina di metri.

Come per il set a scabrezza di II livello, la larghezza dell'area investita dal crollo in R03_III è di poco inferiore, in quanto aumentano ulteriormente le traiettorie marginali anomale in grado di coprire maggiori spazi.

Il rockfall manifesta tra i più elevati valori di intensità, con un picco massimo di 8.788 kJ, equivalenti a 1.384 kJ di energia media per cella; rispetto alla simulazione di I livello l'energia totale è calata di soli 960 kJ (circa 9,8%), mantenendosi pressoché costante all'energia media (1.358 kJ) interessando però una superficie minore (2/3 della superficie di R03_I livello di scabrezza).

In presenza di maggior scabrezza la distribuzione delle classi di energia perde omogeneità; nell'impatto al suolo al momento dell'innesco i massi dissipano molta più energia, conferendo all'area di crollo un potenziale limitato a 1.000-2.000 kJ, contro i 2.000-5.000 delle precedenti

simulazioni. La maggior dispersione dei picchi di intensità alta fa presupporre una caduta dei blocchi di roccia molto più diramata lungo la superficie del versante.

La zona di trasporto, combaciando con le precedenti simulazioni, presenta simili attributi e viene oltrepassata mantenendo come da norma energie costanti a 1.000-2.000 kJ; notevole differenza si riscontra in prossimità della zona di arresto, dove i massi esauriscono completamente la loro energia entro poco meno di una cinquantina di metri; l'arresto avviene in maniera molto brusca (figura 38).

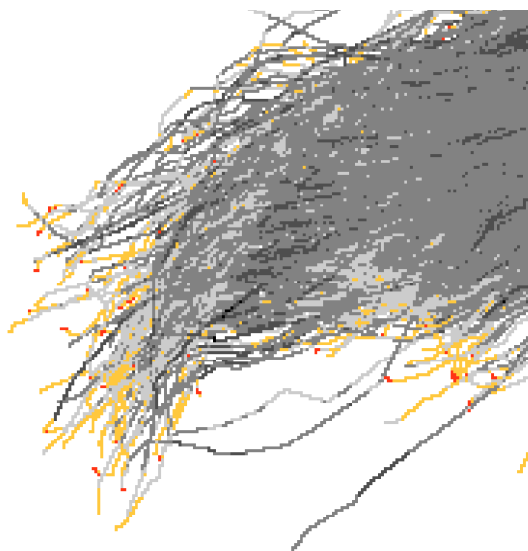


Figura 38: estratto della zona di arresto e della repentina dissipazione energetica dei massi a fine corsa; evidenziate in arancione le velocità a 10 m/s e in rosso quelle di arresto.

Le velocità intraprese dai blocchi di roccia toccano una media di 23,34 m/s, -0,73% rispetto al precedente set di simulazioni; l'aumento di scabrezza ostacola il raggiungimento delle velocità superiori ai 40 m/s; superati i primi 100 metri dalla parete rocciosa, i massi decelerano e proseguono attraverso la restante area di trasporto a velocità medie comprese tra 20-30 m/s. L'analisi delle velocità in zona di arresto dimostra quanto affermato per le energie di arresto: il deposito dei blocchi si verifica in maniere quasi istantanea.

In corrispondenza ad una maggiore energia, la presenza di ostacoli superiori determina un innalzamento delle altezze dei salti dei massi, che si spingono a 1,51 metri di media (+5,3%), con un massimale di 26,55 metri contro i 24,88 rilevati nella precedente simulazione.

Anche in questo caso aumenta la frequenza delle parabole di salto comprese entro il metro di altezza e vi si aggiungono maggiori superfici interessate da balzi di 2÷4 metri presso la zona bassa di trasporto e ai margini dell'area disturbata.

Per quanto riguarda i depositi, la media scende a 1,53 elementi per cella (contro 1,77 di R03_II), con un massimo di 20 elementi rilevati; in presenza di una minor area disturbata ciò dimostra una maggior concentrazione dei blocchi nel sito, in linea con quanto emerso dalle precedenti simulazioni. L'80% dei depositi si arresta entro la zona alta di trasporto, assumendo l'andamento osservato nelle simulazioni prive di soprassuolo forestale.

Tendenzialmente i massi volumetrici fino a 2 metri cubi si arrestano alla base del crollo, rispettando i locali decrementi di pendenza; in zona di arresta aumenta in modo poco percettibile la disposizione dei blocchi di volume prossimo a 3 metri cubi.

L'effetto della scabrezza sembra influire sulla frammentazione delle rocce, scesa a volumetrie medie di 2,17 metri cubi (-0,47% rispetto a R03_II e -1,37% rispetto a R03_I).

In tali circostanze si verificano un numero inferiore di impatti tra massi e foresta (252 contro 356 rilevati nel precedente set, pari a -29.22%), a prescindere dalla differenza di estensione dell'evento.

In media si manifestano 9,57 collisioni per cella, mentre nella precedente simulazione ammontavano a 15,92, (figura 39).

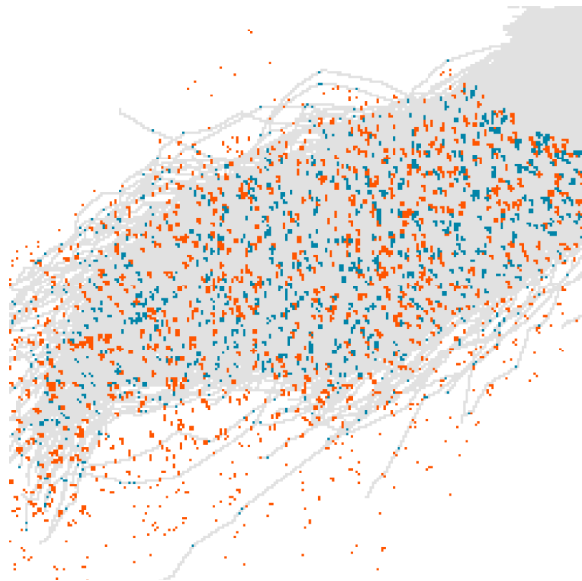


Figura 39: simile distribuzione ma differente frequenza di impatti della zona di trasporto in R03_III (celeste) e R03_II (rosso).

Il numero di passaggi si limita a concentrazioni superiori al 50% in area di crollo, con un quantitativo di traiettorie compreso tra 79 e 399; la restante area si caratterizza per il 20% del totale dei passaggi, similmente allo sviluppo dei rockfalls in ambiente privo di copertura forestale.

Mediamente si rilevano 32,77 passaggi per cella (-29%) ed un massimo di 399 (-11,53%).

Tale circostanza assume un andamento della reach probability che vede il 10% della probabilità spartito lungo gran parte della superficie disturbata; parte della zona alta di trasporto sale a valori prossimi al 20%, con celle distribuite anche in zona bassa di trasporto, specialmente in prossimità della zona di arresta, mentre i picchi del 70% e 100% si limitano a caratterizzare la zona di innesco.

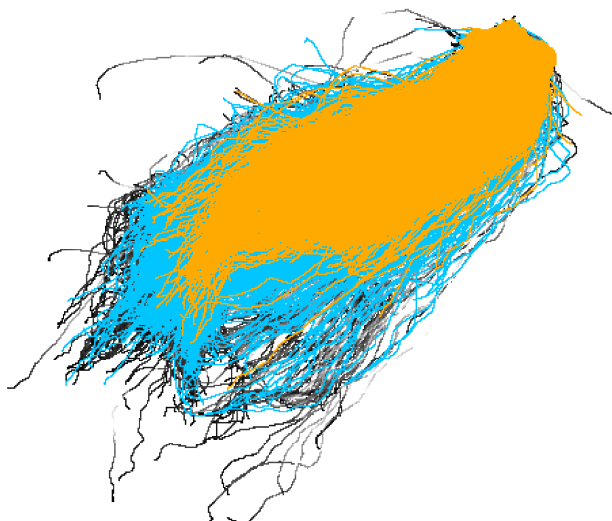


Figura 40: effetto della scabrezza del suolo in presenza di forestale normale; sovrapposizione delle superfici disturbate R03: scabrezza di livello III (in giallo), II (in azzurro) e I (in nero).

B) Confronto dell'effetto dell'incremento dei parametri MOH tra tipologie opposte di ambiente.

Dopo aver esaminato il risultato di simulazioni prodotte a diverso grado di scabrezza nel medesimo ambiente, è stata valutata l'analisi dello stesso evento di crollo in circostanze opposte, ossia su versante privo di soprassuolo forestale. Il confronto tra le due situazione ha prodotto i seguenti risultati.

Differenze tra le simulazioni R04_suolo nudo (12) e R03_foresta normale: I livello di scabrezza.

<i>R04_no for_I</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.248,08	664,46	7.675,11	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,55	1,32	18,00	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	38,67	52,34	456,00	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,69	0,99	22,01	m
<i>Reach_probability.asc</i>	10,78	4,71		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,16	0,51	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	22,36	7,99	69,44	m/s

Tabella 18: parametri di output della simulazione R04_suolo nudo_I livello di scabrezza del suolo.

Nelle medesime condizioni descritte in R03_I livello, la mancanza del soprassuolo forestale risulta determinante nell'evoluzione del crollo in R04_I livello; l'evento sviluppa il 21,30% in meno di energia ma si distribuisce per oltre 500 metri dalla sorgente di innesco.

La tendenza ad intraprendere traiettorie isolate marginali della zona est resta invariata, mentre si aggiungono molti dei percorsi alternativi lungo il margine occidentale.

Il crollo assume comunque aspetto compatto, come nelle simulazioni con foresta; in zona di arresto la conformazione ad "U" delle runout, riscontrata nelle precedenti simulazioni, lascia spazio ad una nuova disposizione a doppia "V".

I valori massimi di energia vengono mantenuti per $\frac{3}{4}$ dell'area di trasporto (corrispondenti alla superficie totale del crollo in R03_I), diminuendo solo in presenza degli incrementi locali di pendenza in zona ovest del sito. La maggior scabrezza del terreno sembra conferire all'evento sensibilità alla micro-morfologia del versante.

In zona di arresto si manifestano accrescimenti delle energie in prossimità delle runout più lunghe.

La differenza tra i due casi si presenta anche alla base della parete: i massi in discesa raggiungono velocità più elevate (30 m/s) che mantengono per gran parte dell'area di trasporto, con picchi di oltre 40 m/s presso lo scoscendimento presente a metà del sito.

Anche per quanto concerne le velocità in zona di arresto molte delle runout terminano bruscamente, senza una progressiva diminuzione delle intensità.

Il suolo tortuoso del versante porta alla realizzazione di traiettorie in aria dei massi di altezza media pari a 1,69 metri contro 1,54 metri di R03_I livello (+8,87%); nel complesso, il salto più alto si limita a 22 metri mentre in bosco raggiunge una quota di 28,06; notevole differenza tra le due simulazioni è ben visibile nel raster *Ph_mean.asc*: alla base della parete rocciosa diminuiscono i salti di altezza superiore ai 2 metri; in testa all'area di trasporto e per tutta la sua lunghezza si moltiplicano invece le celle interessate da un numero di balzi di elevazione pari a 2-4 metri, anche in presenza di superfici sotto i 35° di pendenza. L'innalzamento del pendio in zona est del sito viene superato con parabole in aria tra i 4 e 6 metri (in alcuni casi oltre i 10 metri).

Rispetto alla situazione con foresta, in zona di runout l'energia è ancora tale da favorire maggiormente la presenza di traiettorie paraboliche di 1-2 metri di altezza.

L'analisi degli arresti ha evidenziato che, a differenza di quanto emerso dalle precedenti simulazioni prive di foresta dove i depositi si localizzavano a partire dal piede della parete di crollo, l'aumento di scabrezza svolge un effetto simile a quello offerto dalla copertura forestale, con deposizione dei massi concentrata in zona bassa di trasporto e in zona di arresto.

Dalla simulazione risulta un valore medio di 1,55 elementi per cella con picco a 18; rispetto a R03_I lancio entrambi i numeri sono calati (1,92 di media e 29 come massimale), ma si evidenzia una maggior concentrazione di celle caratterizzata dalla presenza del 50% dei depositi (le concentrazioni sotto il 70% vengono considerate di rischio H4, ossia livello elevato).

Come già accennato, la distribuzione dei depositi rispetta la suddivisione in R03_I livello; i massi di volume superiore giungono fino al piede del sito, risentendo in particolar modo l'effetto della morfologia del versante sotto i 35° di pendenza (figura 41).

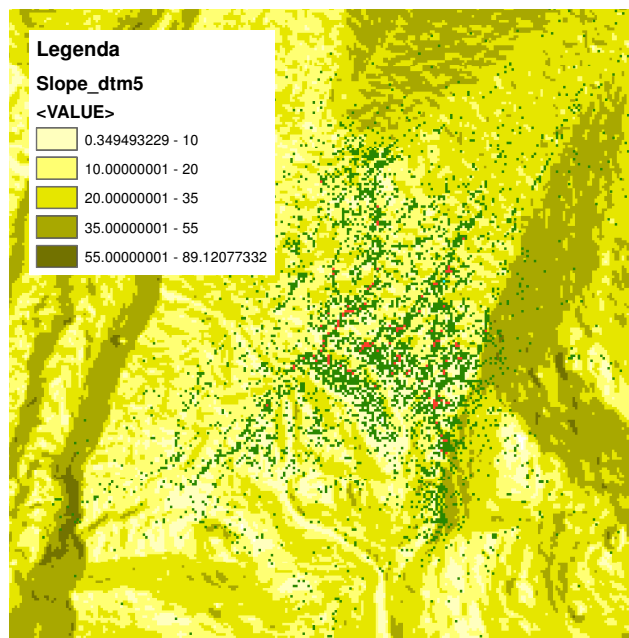


Figura 41: dettaglio della zona di arresto con deposizioni in prossimità dei decrementi di pendenza del versante in corrispondenza dell'aumento di rugosità del terreno.

Un incremento dei depositi si verifica alla base della parete, con l'accumulo di massi di volumetrie superiori a 1,5 metri cubi.

L'aumento di superficie interessata dal crollo e la maggior dispersione dei massi in caduta si manifestano nell'aumento del numero dei passaggi corrispondenti al 20% del totale prodotto, mentre le fasce di versante caratterizzate dal passaggio del 50% dei massi si riducono leggermente.

Medesima situazione per la zona di crollo, alla base della parete, dove diminuiscono le concentrazioni di passaggi del 70% e 90%. Ciò comporta una riduzione del numero medio di passaggi per cella che si porta a 38,67 (-14,33%), con un valore massimo di 456 percorsi contro i 384 risultati in R03_I livello.

Ancora simili i risultati delle due mappe *Reach_probability.asc*: in assenza di foresta l'evento si caratterizza per una probabilità tra il 10-20% lungo l'asse centrale della zona di trasporto, protratta per una lunghezza superiore (un centinaio di metri) rispetto a quella di R03_I livello; le restanti percentuali si concentrano presso la sorgente di crollo.

Differenze tra le simulazioni R04_suolo nudo (13) e R03_foresta normale: II livello di scabrezza.

<i>R04_no for_II</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.143,02	608,53	7.029,04	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,59	1,41	23,00	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	42,04	62,54	588,00	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,54	0,96	20,02	m
<i>Reach_probability.asc</i>	10,94	5,28		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,14	0,51	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	22,57	8,24	69,44	m/s

Tabella 19: parametri di output della simulazione R04_suolo nudo_II livello di scabrezza del suolo.

Su versante nudo in presenza di un grado di scabrezza superiore il fenomeno di crollo occupa una superficie più estesa di quella interessata in R03_II livello; l'aumento riguarda non solo la lunghezza totale dell'area disturbata (+70 metri circa) ma anche l'espansione laterale del rockfall, conferita attraverso lo sviluppo di numerose traiettorie isolate marginali. Quest'ultime assumono percorsi particolarmente sconnessi lungo il margine occidentale.

Nel complesso la scabrosità maggiore sembra enfatizzare l'andamento anomalo dei margini dell'area di rockfall.

In tali circostanze, nonostante la superficie maggiore, l'evento sviluppa la seconda intensità più bassa risultata dall'analisi di tutte le simulazioni prodotte, con appena 7029 kJ di energia.

Come atteso, suddetta simulazione manifesta una maggior sensibilità alle pendenze, che si riflette sull'andamento dell'energia: superata la zona di crollo i massi accumulano acquistano energia (1.000÷2.000 kJ) che mantengono fino al superamento della prima metà dell'area di trasporto, con considerevoli incrementi di potenza (2.000÷5.000 kJ) in presenza delle pendenze superiori ai 35°.

La rugosità del versante porta i massi a mantenere elevate le loro energie cinetiche anche in prossimità della zona di arresto, dove la dissipazione si realizza in tempi brevi, come già dimostrato nel precedente set di simulazioni.

I rasters di input *V_max.asc* nelle due aree di innesco non presentano evidenti variazioni; in assenza di copertura forestale sono molto più frequenti le traiettorie percorse a velocità superiore a 40 m/s, che si distinguono anche presso la zona alta di trasporto e sullo scoscendimento localizzato a metà del sito. In R03_II livello percorsi i primi 280 metri dalla parete rocciosa, le velocità scendono entro i valori medi di 20 m/s, mentre in R04_II livello tale dinamicità si presenta superati oltre 380 metri dalla sorgente di crollo.

Nonostante ciò la velocità media attribuita all'evento è di 22,57 m/s (-4%).

I massi sviluppano salti parabolici di altezza media di 1,54 metri, in aumento rispetto alla precedente simulazione, tuttavia il picco massimo è di 20,02 metri dal suolo contro i 24,88 metri in presenza di foresta.

Anche in questo rockfall la frequenza di rimbalzi compresi tra 1 e 2 metri è superiore ed interessa gran parte della superficie, con un considerevole aumento dei salti tra 2 e 4 metri di altezza, soprattutto in prossimità di bruschi scoscendimenti del versante.

È in suddette zone che alcuni blocchi rocciosi riescono a raggiungere altezze superiori ai 6 metri, mentre si riducono le altezze massime a cui si spingono i massi dopo il primo impatto al suolo nella zona di innesco.

Avendo runout più lunghe il numero dei depositi si sposta a valle del sito rispetto a quanto avviene in R04_II livello ma viene mantenuto il medesimo andamento descritto per la situazione in R03_I livello; i depositi si concentrano superata la prima metà della zona di trasporto secondo la media di 1,59 elementi per cella (-10,17%) e un picco di 23 (+21,74%).

L'aumento di rugosità sembra favorire l'allontanamento dei blocchi di minor volume, che si accumulano in zona di arresto con frequenza maggiore rispetto ai precedenti casi di crollo simulati.

L'assenza di foresta in R04 non comporta un rilevante cambiamento nella distribuzione delle traiettorie di passaggio rispetto al set di raffronto R03; l'asse centrale del fenomeno di crollo resta caratterizzata dal transito del 20% dei massi, con lieve aumento dei passaggi al centro dell'area di trasporto; diminuiscono invece le superfici al 50% ma con l'espansione superiore del rockfall e la maggior diramazione delle traiettorie il numero medio di passaggi scende a 42,04 contro i 46,16 risultati dalla simulazione R03_III livello (-8,92%).

In linea con quanto emerso anche in suddetta zona di crollo si manifesta un incremento delle celle contraddistinte dal 90% dei passaggi di massi: su un massimale di 588 passaggi stimati contro i 451 prodotti in R03_II livello, la differenza tra le due simulazioni è conferita da un centinaio di passaggi localizzati appunto alla base della parete rocciosa in R04_II livello.

Nella *reach probability*, dove ad esclusione della zona di innesco tutto l'evento di crollo si contraddistingue per una probabilità sotto al 20%, le due situazioni risultano omogenee nel complesso; unica differenza è nella maggior lunghezza dell'area di crollo al 20% rispetto alla simulazione in presenza di soprassuolo forestale.

Differenze tra le simulazioni R04_suolo nudo (14) e R03_foresta normale: III livello di scabrezza.

<i>R04_no for_III</i>	<i>Mean</i>	<i>Dev_Std</i>	<i>Max</i>	<i>Val</i>
<i>E_mean.asc</i>	1.387,21	585,83	6.006,12	kJ
<i>Nr_deposited.asc</i>	1,63	1,43	16,00	Num
<i>Nr_passages.asc</i>	23,81	44,52	369,00	Num
<i>Ph_mean.asc</i>	1,52	1,03	19,99	m
<i>Reach_probability.asc</i>	11,34	7,13		%
<i>Rvol_deposit.asc</i>	2,16	0,51	3	m ³
<i>V_max.asc</i>	21,75	6,45	69,44	m/s

Tabella 20: parametri di output della simulazione R04_suolo nudo_III livello di scabrezza del suolo.

Anche l'evento di crollo simulato in suddetto contesto arriva ad occupare una superficie maggiore rispetto al rockfall in bosco di R03_III livello, ma in presenza di elevati parametri di scabrezza i massi in caduta risentono maggiormente l'effetto di attrito al suolo.

Quanto detto è ben visibile in zona di runout: la differenza di lunghezza tra le due simulazioni si riduce ad una sessantina di metri.

Inoltre, cessano di esistere alcune delle traiettorie marginali isolate della zona ovest dell'area di trasporto mentre si ripresentano quelle del margine est, con andamento simile alle precedenti simulazioni.

Il fenomeno di rockfall sviluppa la più bassa intensità energetica rilevata, con soli 6.006 kJ totali; per cella però si evidenziano valori medi di 1.387,21 kJ di potenza.

Al momento del crollo, con il primo impatto al suolo aumentano le superfici contrassegnate da energia superiore ai 500 kJ mentre la discesa lungo la zona di trasporto avviene con intensità prossime a quelle evidenziate in R03_III livello.

In assenza della copertura foresta tali valori si mantengono costanti tra 1.000 e 2.000 kJ, manifestando incrementi di energia solo in presenza dei locali scoscendimenti del versante.

Anche in suddetto caso l'arresto dei blocchi di roccia si verifica molto rapidamente, entro brevi tratti di superficie.

L'andamento delle velocità rispecchia quello delle energie, con valore medio per cella di 21,75 m/s (-6,81%); l'acquisizione di velocità all'inizio della discesa a valle risulta molto difficoltosa e si limita a pochi tratti percorsi sopra i 30 m/s. Rispetto alla situazione con foresta, a metà dell'area di trasporto le velocità rimangono stabili a 20 m/s, per poi scemare ed azzerarsi entro una distanza di un ottantina di metri.

Evidenti differenze tra le due ambientazioni si manifestano analizzando il raster *Ph_mean.asc*: nonostante l'altezza media per cella sia superiore di appena un centimetro in R04 (1,52 metri), la parabola di rimbalzo massimo raggiunge solamente 19,99 metri rispetto ai 26,55 metri (+32,5%) toccati in R03.

In prossimità della parete rocciosa si riducono le aree con salti oltre i 4 metri dal suolo, ma al loro posto aumenta la presenza di massi che rimbalzano fino ad un metro di altezza; rimangono pressoché costanti i balzi compresi tra 1 e 2 metri di quota.

Al contrario, lungo l'area di trasporto i livelli di energie e velocità costanti favoriscono un andamento delle parabole di caduta dei massi di 1÷2 metri da terra, con incrementi dei balzi a 4÷6 metri e a salti in aria fino ad un metro limitati alle fasce marginali dell'area disturbata (figura 42).

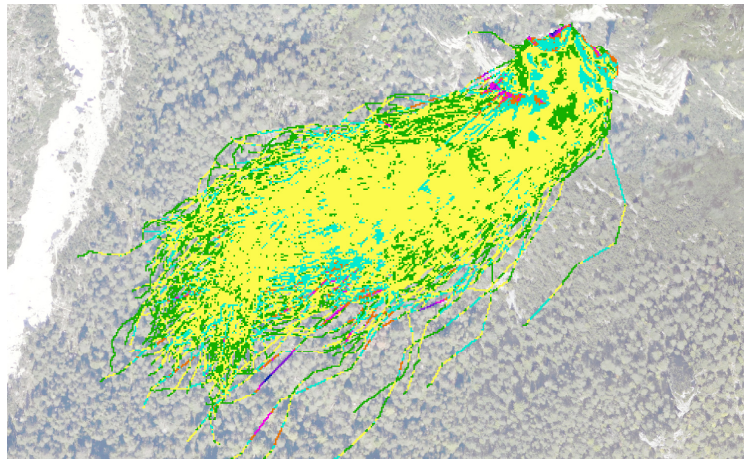


Figura 42: reater *Ph_mean.asc* di R04 al III livello di scabrezza; in verde i salti 0-1 metro, in giallo i salti 1-2 metri e in azzurro le elevazioni superiori a 4 metri.

In queste condizioni aumenta la presenza media di depositi per cella, con un valore di 1,63 elementi contro 1,53 blocchi per R03; il massimo raggiunto scende invece a 16 mentre in presenza di foresta arriva a 20 elementi.

La distribuzione dei depositi è simile alla situazione in presenza di bosco; rispetto a questa si discosta per maggiori concentrazioni di depositi alla base del crollo e in zona alta di trasporto; ovviamente nell'evento di estensione superiore i depositi occupano una superficie più estesa, ma nel complesso le concentrazioni di arresti in zona di crollo innalzano il valore medio di depositi per cella rispetto alle stime in R03_III.

Per quanto riguarda la distribuzione volumetrica dei massi, le due simulazioni presentano il medesimo valore medio (2,16 metri cubi); su suolo nudo al momento del crollo aumenta il numero di depositi di volume superiore a 2,5 metri cubi, mentre in presenza di foresta tali massi si spingono fino al limite superiore del bosco; la presenza dei massi al di sotto del metro e mezzo di volume si limita ad una sola cella in R04.

Dall'analisi della mappa *Nr_passages.asc* risultano una situazione in cui ogni cella viene valicata 23,81 volte, con picco massimo di 369 passaggi su versante nudo. In presenza di copertura, probabilmente per causa dell'effetto "canalizzante" della foresta, il numero medio di passaggi per cella ammonta invece a 32,77 (37,63%) con un massimale di 399 (+8,13%).

Sebbene le medie di $Nr_passages$ siano diverse tra loro, le superficie corrispondenti alle medesime percentuali del numero di passaggi (20-50-70-100%) sono pressoché identiche tra le due simulazioni, ad esclusione dell'area caratterizzata dal 10% delle traiettorie che, ovviamente, ha estensione superiore in relazione alla maggior espansione del fenomeno di crollo.

In ragione di quanto detto anche la *Reach probability* segue lo stesso andamento in entrambe le simulazioni, con la sola differenza di interessare una fascia di superficie più lunga per quanto concerne la probabilità del 10%.

La minor propensione a sviluppare traiettorie isolate marginali in R04 è intuibile alla base del crollo, dove la *Reach probability* assegnata al 10% presenta un restringimento della sezione (figura 43).

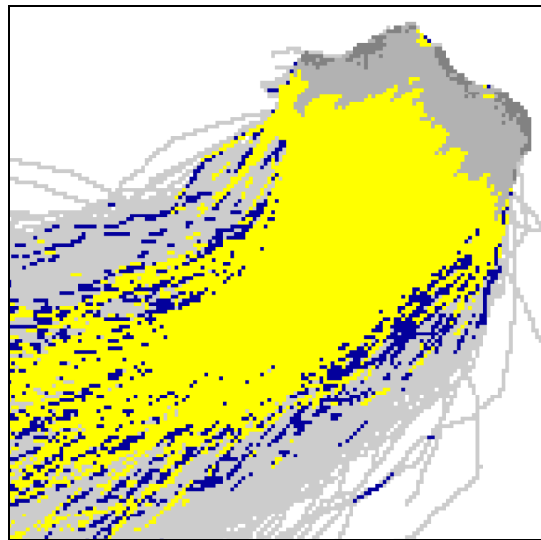
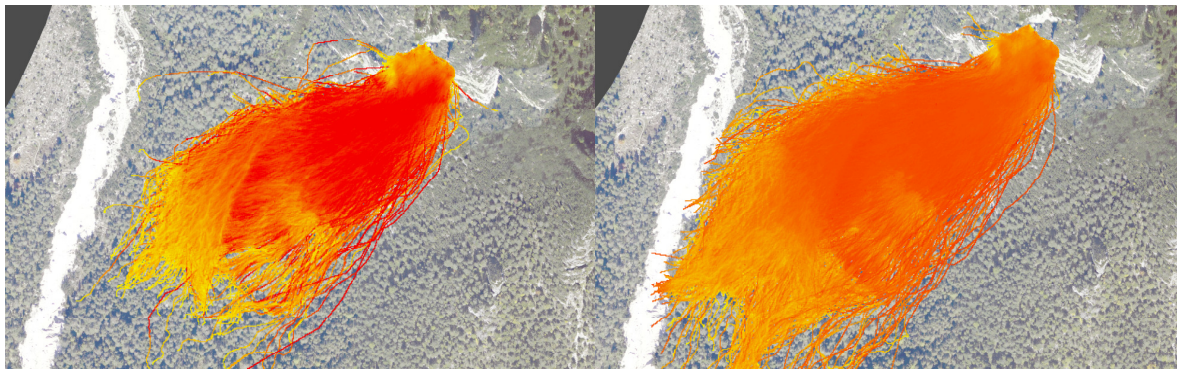


Figura 43: sovrapposizione delle aree delle *Reach probability* 10% di R04 (in giallo) e R03 (in blu) al III livello di scabrezza.

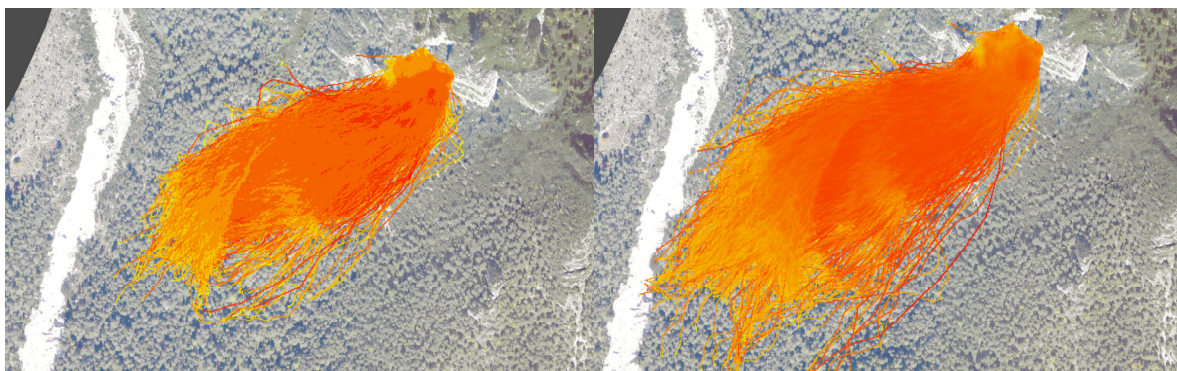
Simulazioni R03_foresta normale

Simulazioni R04_soprassuolo nudo

I livello di scabrezza del suolo



II livello di scabrezza del suolo



III livello di scabrezza del suolo

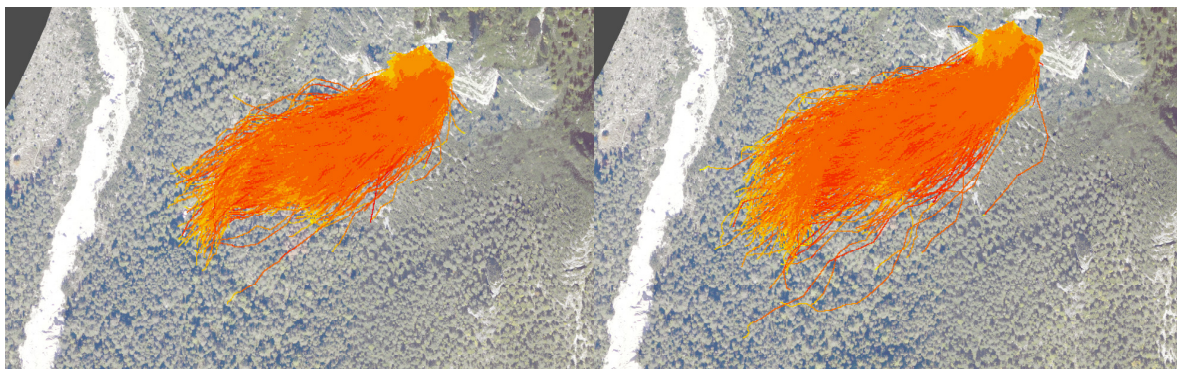


Figura 44: evoluzione del crollo nelle simulazioni R03 e R04.

DISCUSSIONE E NOTE CONCLUSIVE

Nel corso della preparazione delle simulazioni sono state incontrate diverse difficoltà che hanno riguardato differenti aspetti dell'impiego di Rockyfor3D. In molti casi non è stato possibile risolvere il problema ricercando soluzioni in letteratura, bensì è stato necessario procedere per tentativi per sopperire alla carenza di informazioni.

Il primo quesito incontrato in fase di preparazione dei dati di input è stato la scelta della risoluzione spaziale più appropriata dei raster per effettuare le simulazioni; sebbene venga consigliato di optare per risoluzioni di 2x2 metri, 5x5 metri e addirittura 10x10 metri, in tale circostanza, visto il dettaglio di simulazione (ridotta estensione dell'area di analisi), si è scelto di utilizzare mappe con risoluzione spaziale di 1 metro.

Un secondo problema emerso ha interessato il numero di lanci per simulazione; anche in questo caso la letteratura manca di informazioni dettagliate, in quanto viene consigliato di orientarsi verso un numero di lanci pari a 100 ma non vi è alcun riferimento atto ad indirizzare la scelta in relazione al proprio caso; sulla base delle esperienze pregresse, in presenza di eventi di crollo di dimensioni contenute, dove l'azione di ogni singolo blocco di roccia ha una propria incisività rispetto all'andamento globale dell'evento, sembra più corretto ridurre a poche decine il numero di lanci iniziali. La scelta va inoltre relazionata all'estensione e al numero di aree sorgenti presenti nel caso di studio, come è avvenuto per il crollo presentato nell'elaborato. Si è scelto quindi di porre particolare attenzione agli esiti della modellazione, riproponendo la medesima simulazione per un numero di lanci pari ad 1, 10 e 100. Impostando però, un numero di lanci pari ad uno, il raster di output *Reach_probability.asc* perde di significato, dal momento che tale mappa viene prodotta ponendo in relazione tra loro il numero di simulazioni, il numero di celle sorgenti e il numero di passaggi per cella.

Ulteriore criticità per l'esito delle simulazioni si è presentata alla scelta o meno, e quale valore attribuire, al parametro della variazione percentuale del volume del masso associato a ciascuna cella sorgente. Nel caso di studio qui presentato si è adottata una variazione di $-/+ 50\%$; tale valore rappresenta l'unico parametro del modello in grado di simulare la frammentazione del blocco roccioso al momento dell'impatto sul versante, a seguito della caduta libera dalla parete rocciosa.

Realizzate le simulazioni, l'interpretazione dei dati di output ha presentato alcune difficoltà riguardanti l'attendibilità del raster, come ad esempio nel caso del volume delle rocce in *Rvol_deposit.asc*, poiché nella maggior parte dei casi non vi è la possibilità di raccogliere in campo informazioni certe sul grado di frammentazione dei blocchi rocciosi in seguito ai vari impatti al suolo durante la discesa a valle.

Nonostante ciò, l'applicazione di Rockyfor3D per le simulazioni di crolli ambientati in diverse circostanze è risultata estremamente utile nell'analisi di singoli aspetti caratterizzanti gli eventi di rockfalls.

Sorvolando gli aspetti più assodati risultati dalle simulazioni, come la maggior espansione areale dei crolli in assenza di soprassuolo in R01 o della ridotta scabrezza del terreno in R03 e R04, l'intensificazione del fenomeno di rockfall prodotto a 100 lanci, totalmente differente alla medesima situazione riproposta a un solo lancio o la maggior capacità di dissipazione dell'energia cinetica dei massi operata da una copertura forestale in buone condizioni rispetto ad una in forte stato di stress, sono state notate alcune qualità dei raster.

Quanto detto potrebbe risultare di notevole utilità nella realizzazione di studi puntuali e mirati, come ad esempio la mappatura del pericolo delle zone interessate da crolli. È presumibile che comportamenti analoghi del rockfall, rilevati anche in circostanze dissimili, abbiano maggior probabilità di verificarsi nella realtà.

Una dimostrazione di suddetta teoria, per quanto concerne il caso di studio di Vodo di Cadore, trova fondamento nella morfologia del versante: a prescindere dai parametri introdotti nelle varie simulazioni, la zona est della stazione ha manifestato evoluzioni di crollo molto simili tra loro, caratterizzate dalla presenza di traiettorie di massi isolate molto lunghe e di energia elevata e costante.

Le pendenze del versante non sono sempre state un fattore chiave, sia nello sviluppo del crollo che nelle elevazioni delle parabole in aria e nella disposizione dei depositi anche se, generalmente, hanno comportato uno spostamento delle traiettorie preferenziali dei massi verso la zona ovest della stazione. Tale propensione rispecchia comunque la realtà in cui si trova il caso di studio di Vodo di Cadore.

Le simulazioni ad un lancio, benché erronee, si sono rivelate molto utili nell'individuazione dei percorsi intrapresi dalla maggior parte dei massi in caduta e nell'analisi delle dislocazioni selettive dei blocchi rocciosi a volumetrie crescenti, mentre le simulazioni a 10 lanci sono risultate molto più sensibili alle pendenze per quanto riguarda l'arresto dei massi.

Sebbene con suolo nudo ci siano state notevoli differenze in seguito all'utilizzo di 1, 10 o 100 lanci, nelle simulazioni provviste di soprassuolo forestale l'applicazione di un numero variabile di lanci non ha prodotto evidenti discrepanze nell'estensione laterale del fenomeno. Oltre ad ostacolare la discesa a valle dei massi, la foresta ha manifestato la tendenza a circoscrivere ed impedire l'estensione areale dell'evento di crollo, concentrandolo al centro della stazione.

Alla riduzione della superficie disturbata in foresta, non corrisponde però un aumento delle energie e delle velocità che, al contrario si mantengono più costanti e di livello inferiore. Nel complesso, l'intensità del fenomeno si riduce e le sue energie vengono distribuite in maniera più omogenea sul territorio; tale effetto è particolarmente evidente ai margini della superficie disturbata, in quanto non si verificano più improvvisi incrementi di energia.

Nonostante ciò, non emergono particolari effetti della foresta sulla composizione volumetrica dei depositi (soprattutto nel set R01 a 10 lanci), mentre lo spazio di arresto dei massi varia di molto rispetto alle situazioni prive di copertura, in cui i blocchi si depositano a partire dalla zona di crollo (la foresta comporta invece runout più lunghe e massi scesi fino al piede del sito).

Generalmente l'ambiente forestale produce Ph_{mean} superiori, condizione evidente in R01 ad un lancio, probabilmente in seguito alla maggior frequenza di impatti tra piante e massi. Quanto detto si manifesta anche in presenza di incrementi locali delle pendenze, con aumento delle altezze medie di rimbalzo da 0-1 metro fino a 1-2 metri. In presenza di vegetazione integra, i massi in caduta risultano molto meno sensibili alla morfologia del versante; al contrario, nelle foreste danneggiate sia i passaggi dei massi che gli arresti rispettano maggiormente la conformazione del territorio.

Infatti, i crolli in foresta danneggiata si presentano molto più simili alle situazioni simulate su suolo nudo, con evoluzione del rockfall proiettata verso l'ovest della stazione.

La vegetazione non implica però alcuna conseguenza per quanto concerne la *Reach probability*, che si mantiene sostanzialmente invariata sia in presenza di soprassuolo o versante nudo.

Dall'analisi della scabrezza del suolo sono emerse capacità di dissipazione dell'energia dei massi equiparabili all'azione diretta di protezione offerta dalla vegetazione.

La rugosità del versante favorisce la sensibilità dei massi alle diminuzioni di pendenza, al punto di favorirne arresti superiori a quelli prodotti dalla copertura forestale; tale potere si limita però alle inclinazioni al di sotto dei 35°.

A differenza delle altre simulazioni, è solo grazie alla scabrezza del versante che si manifestano depositi a partire da poche decine di metri dalla zona di innesco del crollo, con minori quantitativi riversati in zona di runout.

Quanto detto potrebbe trovare risposta nella maggior dissipazione energetica dei massi, favorita da un numero superiore di ostacoli al suolo, che comportano una maggior frequenza di parabole di rimbalzo più corte e ad un notevole assorbimento delle energie al momento del primo impatto al suolo seguito all'innesco del crollo.

Dall'analisi dei dati di output di Rockyfor3D mostrati per ogni Scenario, la simulazione *R02_foresta disturbata* a 10 lanci è risultata essere la più attinente all'evento di rockfall verificatosi presso il sito di Vodo di Cadore; non essendo stato possibile risalire alle reali energie e velocità del crollo, raster come *Nr_deposited.asc*, appurabili anche in campo, hanno assunto un ruolo fondamentale nell'individuazione di caratteristiche compatibili tra simulazione e realtà. Su tali basi è stato possibile giungere, quindi, alla scelta più opportuna del numero di lanci per simulazione (pari a 10), ad esempio. Della stessa linea, un altro utile elemento di confronto è stato il rapporto *B/R*, relazione tra la massima estensione della zona di arresto *B* del fenomeno di crollo e la lunghezza di runout *R* più alta.

Suddetto rapporto ha permesso di equiparare l'evento di crollo più realistico (*R02_foresta disturbata_10 lanci*) ai rockfalls delle restanti 13 simulazioni, così da individuare per ogni Scenario i parametri connessi al caso di studio, eliminando i set inappropriati.

Anche secondo questa relazione, l'effetto dei lanci maggiormente veritiero è appunto quello portato a 10, in cui l'azione della gravità è determinante nello sviluppo longitudinale del crollo di roccia, anziché conferire un'estensione areale al disturbo, non riscontrabile nella realtà del sito; ovviamente la situazione di *R02_foresta disturbata* descrive l'evento di rockfall più probabile, in quanto è stata realizzata secondo i dati rilevati in campo, con un rapporto *B/R* di 0.589, molto diverso da 0.51 della simulazione *R02_foresta normale*, equiparabile invece al valore di 0.585 emerso dal set a scabrezza di II livello in R04 (suolo nudo). Infatti, in considerazione della foresta normale e del suo effetto protettivo, il crollo di roccia ha avuto uno sviluppo paragonabile a rockfall simulato su versante con soprassuolo, in condizioni di scabrezza inferiore, come nelle simulazioni *R03_II livello di scabrezza* e *R03_I livello di scabrezza*.

BIBLIOGRAFIA

- Agliardi F., Crosta G.B. (2003), "High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Scienc*, n.40, pp.455-471.
- Azzoni A., Barbera G.L., Zaninetti A. (1995), "Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Scienc*, n.32, pp.709-724.
- Baillifard F., Jaboyedoff M., Rouiller J. D., Couture R., Locat J., Robichaud G., Gamel G. (2004), "Towards a GIS-based hazard assessment along the Quebec City Promontory, Quebec, Canada", *Landslides Evaluation and stabilization*, Lacerda Ed., pp.207-213.
- Barton N., Choubey V. (1978), "The shear strength of rock joints in theory and practise", *Rock Mech*, n.10, pp.1-54.
- Berretti R., Caffo L., Camerano P., De Ferrari F., Domaine A., Gottero F., Haudemand J.C., Letey C., Meloni F., Motta R., Terzuolo P.G. (2006), "Selvicoltura nelle foreste di protezione. Esperienze e indirizzi gestionali in Piemonte e Valle d'Aosta", Ed. Compagnia delle Foreste, 225 pp.
- Bertozzi E., Broili L. (1978), "Considerazioni sui criteri di progettazione delle opere di difesa nei processi di scendimento massi", *Mem. Soc. Geol. It.*, n.18, pp.187-195.
- Bollo F., Hacar R (1977), "Bodies falling down on different slopes. Dynamic studies", *Rock. 9th Int. Con. Soil Mech. Found. Engng*, n. 2, pp.91-95.
- Botkin D.B., Janak J.F., Wallis. J.R. (1972), "Some Ecological Consequences of a Computer Model of Forest Growth", *Journal Ecology*, n.60, pp.849-872.
- Bozzolo, D., Pamini, R. (1986), "Simulation of rock falls down a valley side", *Acta Mechanica*, n.63, pp.113-130.
- Brang P. (2001), "Resistance and elasticity: promising concepts for the management of protection forests in the Alps", *For. Ecol. Manage.*, n.145 (1), pp.107-117.
- Brauner M., Weinmeister W., Agner P., Vospernik S., Hoesle B. (2005), "Forest management decision support for evaluating forest protection effects against rockfall", *For. Ecol. Manage.*, n.207, pp.75-85.
- Broili, L. (1974), "Ein Felssturz in Großversuch", *Rock Mechanics Suppl.*, n.3, pp.69-78.
- Bugmann H.K.M., Solomon A.M. (2001), "Explaining Forest Composition and Biomass Across Multiple Biogeographical Regions", *Ecol. Appl.*, n.10, pp.95-114.

- Coutard J.P., Francou B. (1989), “Rock temperature measurements in two alpine environments: implications for frost shattering”, *Arctic and Alpine Research*, n.21, pp.399-416.
- Couvreur S. (1982), “Les forêts de protection contre les risques naturels”, École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF) paper (www.agroparistech.fr), 89 pp.
- Cundall P.A. (1977), “The measurement and analysis of accelerations in rock slopes”, *Thesis of Doctor of Science and Technology*, London.
- Dorren L.K.A. (2012), “Rockyfor3D (v.5.1) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model”, *Ecorisq paper* (www.ecorisq.org), 31 pp.
- Dorren L.K.A, Berger F. (2006), “Stem breakage of trees and energy dissipation at rockfall impacts”, *Tree Physiol*, n.26, pp. 63-71.
- Dorren L.K.A., Berger F., Putters US (2006), “Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forest slopes”, *Nat. Hazards Earth Syst*, n.6, pp.145–153.
- Dorren L.K.A., Berger F., Lehir C., Mermin E., Tardif P. (2005), “Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests”, *For. Ecol. Manage.*, n.215 (1-3), pp.183-195.
- Dorren L.K.A., Heuvelink G. (2004), “Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model”, *Int. J. GIS*, n.18, pp.595-609.
- Dorren L.K.A., Maier B., Putters U.S., Seijmonsbergen A.C., (2004), “Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps”, *Geomorphology*, n.57 (3-4), pp.151-167.
- EPOCH (1991-1993), “The *temporal occurrence* and forecasting of *landslides* in the European community”, Ed. Flageollet J.C., Contract n.900025, terzo volume.
- Erismann T.H. (1986), “Flowing, rolling, bouncing, sliding, synopsis of basic mechanisms”, *Acta Mechanic*, n.64, pp.101-110.
- Evans S.G., Hungr O. (1993), “The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes”, *Canadian Geotechnical Journal*, n.30, pp.620-636.
- Faccoli M., Colombari F., Dal Pont C. Finozzi V., D’Ambros E., Battisti A. (2010), “Gravi infestazioni di bostrico acuminato in formazioni alpine di pino silvestre”, *Forest@ - Italian Society of Silviculture and Forest Ecology*, n.7, pp.259-267.
- Foetzki A., Jonsson M.J., Kalberer M., Simon H., Mayer A.C., Lundström T., Stöckli V., Ammann W. (2004), “Die mechanische Stabilität von Bäumen: das Projekt Baumstabilität des FB Naturgefahren”, in *Wissen 2004: Schutzwald und Naturgefahren, Davos, Switzerland*, Ed. E.F. WSL, pp.35-42.

- Friedel H. (1935), "Beobachtungen an den Schutthalden der Karawanken", *Carinthia II*, n.125/45, pp.21-33.
- Gerber W. (1998), "Waldwirkung und Steinschlag", in *Dokumentation der 14. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN*, Ed. Schwitter R., Grafenort/Engelberg, 15 pp.
- Grove J.M. (1972), "The incidence of landslides, avalanches and floods in western Norway during the Little Ice Age", *Arctic and Alpine Research*, n. 4, pp.131-138.
- Gsteiger P. (1993), "Steinschlag Schutzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung", *Schweiz Z Forstwes*, n.144, pp115-132.
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R., Agliardi F., (2002), "STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls", *Comp. Geosci*, n.28, pp.1079-1093.
- Habib P., (1977), "Note sur le rebondissement des blocs rocheux", *Reports on meeting: Rockfall Dynamics and Protective Works*, ISMES, Publication n. 90, pp.123-125.
- Hallabauer C. (1986), "Contribution to crash behavior of rock masses", *Time F Angew Geol.*, n.32, pp. 39-42.
- Hsü K.J. (1975), "Catastrophic debris streams (Sturzstroms) generated by rockfalls", *Geological Society of America Bulletin*, n.86, pp.129-140.
- Jaboyedoff M., Dudt J.P., Labiouse V. (2005), "An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree", *Nat. Hazards Earth Syst*, n.5, pp.621-632.
- Jahn J. (1988), "Entwaldung und Steinschlag", *Interpraevent*, Graz. Tagungspubl. Bd., n.1, pp.185-198.
- Jonsson M. (2007), "Energy absorption of trees in a rockfall protection forest", *Ph.D. thesis*, Zurich.
- Kemeny J., Turner K., Norton B. (2006), "LIDAR for rock mass characterization: hardware, software, accuracy and best-practices. Laser and Photogrammetric Methods for Rock Face Characterization", *ARMA*, edited by Tonon F. and Kottenstette J., pp.49-62.
- Keylock C.J., Domaas U. (1999), "Evaluation of topographic models of rockfall travel distance for use in hazard applications", *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, n.31, pp.312-320.
- Kirkby M.J., Statham I. (1975), "Surface stone movement and screen formation", *J. Geol.*, n.83, pp.349-362.
- Le Hir C., Berger F., Dorren L.K.A., Quetel C. (2004), "Forest: a natural means of protection against rockfall, but how to reach sustainable mitigation?", *Proceedings of the International Symposium Interpraevent*, Riva/Trient, Italy, n.5, pp.59-69.

Leonardi P. (1967), “Le Dolomiti: geologia dei monti tra Isarco e Piave”, Manfrini Ed. 2, pp.925-935.

Lundström, T., Jonas T., Stöckli V., Ammann W. (2009), “Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation”, *Tree Physiol*, n.27, pp.1217-1227.

Matsuoka N., Sakai H. (1999), “Rockfall activity from an alpine cliff during thawing periods”, *Geomorphology*, n. 28(3), pp.309-328.

McCarroll D., Shakesby R.A., Matthews J.A. (1998), “Spatial and temporal patterns of late Holocene rockfall activity on a Norwegian talus slope: a lichenometric and simulation modeling approach”, *Arctic and Alpine Research*, n.30(1), pp.51-60.

Meissl G. (1998), “Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Beierischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geografischen Studien 28”, *Ph.D. Thesis*, Universität Innsbruck, Innsbruck, 249 pp.

Motta R., Haudemand J.C. (1999), “Protective forests and silvicultural stability – An example of planning in the Aosta Valley”, *Mt. Res. Dev.*, n.20 (2), pp.180-187.

NORME UNI (2007) - *opere di difesa dalla caduta massi*.

Norrish N., Wyllie D. (1996), “Landslides – Investigation and mitigation”, *Rock slope stability analysis*, edited by Turner A. and Schuster R. L., *Transportation Research Board*, special report 247, 673, National Academy Press, Washington, DC.

O’Callaghan J.F., Mark D.M. (1984), “The extraction of drainage networks from digital elevation models”, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, n.28, pp.323-344.

Oppikofer T., Jaboyedoff M., Keusen H.R. (2007), “Collapse at the eastern Eiger flank in the Swiss Alps”, *Nat. Geosci*, n.1, pp.531-535.

Perret S., Dolf F., Kienholz H., (2004), “Rockfalls into forests: Analysis and simulation of rockfall trajectories – considerations with respect to mountainous forests in Switzerland”, *Landslides*, pp.123-130.

Pfeiffer T.J., Bowen T.D. (1989), “Computer simulation of rockfalls”, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, n. XXVI(1), pp.135-146.

Pichler B., Hellmich C., Mang H. (2005), “Impact of rocks into gravel - Design and evaluation experiments”, *Int. J. Impact Eng.*, n.31, pp.559-578.

Porter S.C., Orombelli G. (1981), “Alpine rockfall hazards”, *American Scientist*, n.69(1), pp.67-75.

- Porter S.C., Orombelli G. (1980), "Catastrophic rockfall of September 12, 1717 on the Italian flank of the Mont Blanc Massif", *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, n.24, pp.200-218.
- Rammer W., Brauner M., Dorren L.K.A., Berger F., Lexer M.J. (2010), "Evaluation of a 3D Rockfall Module Within a Forest Patch Model", *Natural Hazards and Earth System Science*, n.10 (4), pp.699-711.
- Ramming A., Fahse L., Bugmann H., Bebi P. (2006), "Forest regeneration after disturbance: a modelling study for the Swiss Alps", *Forest Ecol. Manag.*, n.222, pp.123-136.
- Rickli C., Graf F., Gerber W., Frei M., Boll A. (2004), "Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs", in "Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Schutzwald und Naturgefahren", *Wissen 2004*, Bruhin AG, Ed. Freienbach, pp.27-34.
- Ritchie A.M. (1963), "Evaluation of rockfall and its control", *Highway Research Record*, Washington, DC: Highway Research Board, National Research Council, n.17, pp.13-28.
- Scheidegger A.E. (1975), "Physical aspects of natural catastrophes", *Amsterdam/New York: Elsevier*.
- Schumm S.A., Chorley R.J. (1964), "The fall of endangering rock", *American Journal of Science*, n.262, pp.1041-1054.
- Schwitler R. (1998), "Zusammenfassung und Schlussfolgerungen", *Arbeitstagung Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe*, unpublished report Grafenort/Engelberg, pp.1-5.
- Selby M.J. (1982), "Hillslope materials and processes", *New York: Oxford University Press*.
- Spang R.M., Krauter E. (2001), "Rockfall simulation – a state of the art tool for risk assessment and dimensioning of rockfall barriers", in Kühne M., et al., *International Conference on Landslides – Causes, Impacts and Countermeasures*, Unides Foundation Engineering Davos, Switzerland, pp.607-613.
- Stoffel M., Lievre I., Monbaron M., Perret S. (2006), "Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Taschgufer (Swiss Alps) - a dendrochronological approach", *Zeit. Geom. N.F.*
- Stokes A., Salin F., Kokutse A.D., Berthier S., Jeannin H., Mochan S., Dorren L.K.A., Kokutse N., Ghani M.A., Fourcaud T. (2005), "Mechanical resistance of different tree species to rockfall in the French Alps", *Plant Soil*, n.278, 1-2, pp.107-117.
- Varnes D. (1978), "Slope movement, types and processes". *Special Report, National Academy of Sciences*, Washington, DC, volume 176, pp.11-33.
- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L.K.A., Gerber W., Jaboyedoff M. (2011), "Rockfall characterisation and structural protection – a review", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, n.11, pp.2617-2651.
- Vospertnik S. (2002), "Predicting forest growth against rockfall", *Final report, Institute of Forest Growth and Yield*, University of Agricultural Sciences, Vienna, 72 pp.

Wasser B., Frehner M. (1996), "Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion. Wegleitung", Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, 122 pp.

Woltjer M., Rammer W., Brauner M., Seidl R., Mohren G.M.J., Lexer M.J. (2007), "Coupling a 3D patch model and a rockfall module to assess rockfall protection in mountain forests", *Environ. Manag.*, n.87, pp.373-388.

Zevenbergen L.W., Thorne C.R. (1987), "Quantitative analysis of land surface topography", *EarthSurf Proc. And Landf*, n.12, pp.47-56.

Zinggeler A. (1990), "Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern: Modellierung der relevanten Teilprozesse", *MSc Thesis*, Universität Bern, Bern, 116 pp.

Zinggerle A. (1989), "Die Modellierung der Steinschlaggefahr in Gebirgswäldern", *Diplomarbeit unveröffentlicht*, Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.